

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Geodinámica



**RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN CUENCAS
FLUVIALES:
ASPECTOS CUALITATIVOS Y MEDIOAMBIENTALES
CRITERIOS TÉCNICOS DERIVADOS DE LA
EXPERIENCIA EN LA CUBETA DE SANTIUSTE
(SEGOVIA)**

**MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE
DOCTOR POR**

Enrique Fernández Escalante

Bajo la dirección de los Doctores:

**Manuel García Rodríguez
Fermín Villarroya Gil**

Madrid, 2004

ISBN:84-669-2800-6



DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

TESIS DOCTORAL
Ph.D. THESIS

HIDROGEOLOGÍA MEDIOAMBIENTAL

**RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN CUENCAS FLUVIALES.
ASPECTOS CUALITATIVOS Y MEDIOAMBIENTALES.
CRITERIOS TÉCNICOS DERIVADOS DE LA EXPERIENCIA EN LA
*CUBETA DE SANTIUSTE (SEGOVIA)***

AUTOR: A. ENRIQUE FERNÁNDEZ ESCALANTE

**DIRECTORES: MANUEL GARCÍA RODRÍGUEZ
FERMÍN VILLARROYA GIL**

MADRID

SEPTIEMBRE DE 2004





DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

**RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN CUENCAS FLUVIALES.
ASPECTOS CUALITATIVOS Y MEDIOAMBIENTALES.
CRITERIOS TÉCNICOS DERIVADOS DE LA EXPERIENCIA EN LA
CUBETA DE SANTIUSTE (SEGOVIA)**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA EN EL DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA
POR A. ENRIQUE FERNÁNDEZ ESCALANTE
PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS GEOLÓGICAS
POR LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

LA TESIS HA ESTADO DIRIGIDA POR LOS DOCTORES
MANUEL GARCÍA RODRÍGUEZ Y FERMÍN VILLARROYA GIL

VISTO BUENO DE LOS DIRECTORES:

MANUEL GARCÍA RODRÍGUEZ
DIRECTOR

FERMÍN VILLARROYA GIL
CODIRECTOR

MADRID, SEPTIEMBRE DE 2004



RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN CUENCAS FLUVIALES.
ASPECTOS CUALITATIVOS Y MEDIOAMBIENTALES.
CRITERIOS TÉCNICOS DERIVADOS DE LA EXPERIENCIA EN
LA CUBETA DE SANTIUSTE (SEGOVIA)

ÍNDICE

MEMORIA

PREÁMBULO

LISTADO DE ACRÓNIMOS EMPLEADOS.....	13
I. AGRADECIMIENTOS	17
II. PRÓLOGO	19
III. INTRODUCCIÓN GENERAL	23
IV. JUSTIFICACIÓN.....	25
V. OBJETIVOS.....	26
VI. HILO ARGUMENTAL.....	29
VII. MATERIALES Y MÉTODOS COMUNES	33
VIII.FUENTES DE DATOS.....	36

ÍNDICE TEMÁTICO

BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN. LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS. CIENCIA Y LEGALIDAD

BLOQUE 2. CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

BLOQUE 3. OBJETIVO “BUEN ESTADO DE LAS AGUAS” (BEDLA). ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

BLOQUE 4. MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

BLOQUE 5. PROPOSICIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO-ACUÍFERO (SAT)

BLOQUE 6. CONTRIBUCIONES A LA EDUCACIÓN AMBIENTAL. PROPUESTA DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN





ÍNDICE GENERAL

BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN. LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS. CIENCIA Y LEGALIDAD

ÍNDICE DEL BLOQUE 1.....	39
1. INTRODUCCIÓN.....	43
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
3. LA RECARGA NATURAL (NR) Y RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (AR o MAR). ESTADO DE LA CUESTION	44
4. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	106
5. PRESENTACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	132
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL BLOQUE 1	158

BLOQUE 2. CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ÍNDICE DEL BLOQUE 2.....	165
1. INTRODUCCIÓN.....	171
2. HILO CONDUCTOR.....	172
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	174
4. MARCO TEÓRICO	177
5. GEOLOGÍA DE LA CUBETA DE SANTIUSTE	180
6. CLIMA	241
7. HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE	246
8. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. CONTRIBUCIONES	253
AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL MEDIO	253
9. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO SUPERFICIAL.....	298
10. RECARGA ARTIFICIAL EN LA CUBETA DE SANTIUSTE.....	324
11. DIVISIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN UNIDADES HOMOGÉNEAS	386
12. CONCLUSIONES DEL BLOQUE 2.....	392

BLOQUE 3. OBJETIVO “BUEN ESTADO DE LAS AGUAS” (BEDLA). ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

ÍNDICE DEL BLOQUE 3	407
1. INTRODUCCIÓN	415
2. HILO CONDUCTOR	417
3. MATERIALES Y MÉTODOS	419
4. ESTADO DEL ARTE	434
5. FRACCIÓN LÍQUIDA: EL AGUA	447
6. FASE SÓLIDA: EL SUELO. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO	609
ÓN DEL TERRENO. ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN	634
7. PREVISIÓN DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-SUELO MEDIANTE CÓDIGOS DE MODELIZACIÓN	636
8. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEDUCIDAS DE LA HIDROGEOQUÍMICA	672
9. CONCLUSIONES DEL BLOQUE 3	674

BLOQUE 4. MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ÍNDICE DEL BLOQUE 4.....	689
1. INTRODUCCIÓN.....	693
2. HILO CONDUCTOR.....	696
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	697



4.	ESTADO DEL ARTE	699
5.	DEFINICIÓN DEL ENTORNO PREOPERACIONAL	707
6.	DISEÑO Y APLICACIÓN DE CRITERIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL	770
7.	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	859

BLOQUE 5. PROPOSICIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO-ACUÍFERO (SAT)

ÍNDICE DEL BLOQUE 5.....	865
1. INTRODUCCIÓN.....	867
2. HILO CONDUCTOR.....	868
3. MÉTODOS Y MATERIALES.....	869
4. ESTADO DE LA CUESTIÓN. CONCEPTOS PREVIOS Y REGLAS DE USO COMÚN EN LAS OPERACIONES DE AR.....	870
5. IMPACTOS Y DISFUNCIONES DETECTADOS EN LA CUBETA DE SANTIUSTE TRAS DOS CILOS DE RECARGA ARTIFICIAL	876
6. ALTERNATIVAS APLICABLES EN CADA SITUACIÓN CONCRETA	884
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL BLOQUE 5	917

BLOQUE 6. CONTRIBUCIONES A LA EDUCACIÓN AMBIENTAL. PROPUESTA DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

ÍNDICE DEL BLOQUE 6.....	923
BLOQUE 6.- CONTRIBUCIONES A LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	925
1. INTRODUCCIÓN.....	925
2. HILO CONDUCTOR.....	925
3. LA EDUCACIÓN AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA PARA DAR A CONOCER LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS	927
4. PROPUESTA DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	940
5. CONCLUSIONES DEL BLOQUE.....	944

CONCLUSIONES GENERALES.....	945
------------------------------------	------------



ÍNDICE DE ANEXOS

BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN

ANEXO 1.1.- ANÁLISIS DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE

ANEXO 1.2.- DEMOGRAFÍA Y PATRIMONIO DE LA ZONA DE ESTUDIO

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.1. LINEAMIENTOS DEDUCIDOS POR FOTOINTERPRETACIÓN

ANEXO 2.2. PROSPECCIÓN. DATOS DIRECTOS E INDIRECTOS

ANEXO 2.3. DATOS MESOESTRUCTURALES

ANEXO 2.3.1. Datos mesoestructurales obtenidos en la estaciones geomecánicas y fotografías

ANEXO 2.3.2. Índice de gradiente del thalweg (SI) e índice de sinuosidad de escarpes (Vf). Datos de cálculo

ANEXO 2.3.3. Estudio del relieve mediante derivadas direccionales. metodología y cartografías

ANEXO 2.4. DATOS CLIMÁTICOS Y BALANCE HÍDRICO

ANEXO 2.4.1. Datos climáticos. Estación 2502, Santiuste de San Juan Bautista

- Precipitación mensual
- Temperatura

ANEXO 2.4.2. Balance hídrico. Cálculo por los métodos directo y exponencial

ANEXO 2.5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

ANEXO 2.5.1. Perfiles hidrogeológicos

ANEXO 2.6. PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y BAREMOS DE CLASIFICACIÓN

ANEXO 2.7. REDES DE CONTROL

ANEXO 2.7.1. Red de Control de la Piezometría (RCP)

ANEXO 2.7.2. Red de Control de la Recarga (RCR)

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

ANEXO 3-1 AGUAS

ANEXO 3.1.1. Polos fríos del sistema

3.1.1.1/2. Resultados analíticos/parámetros inestables

3.1.1.3. Caracterización

ANEXO 3.1.2. Red de Control de la Hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)

3.1.2.1. Resultados analíticos

3.1.2.2. Determinación de parámetros inestables

3.1.2.3. Caracterización

3.1.2.4. Cartografía temática. mapas de isocontenidos” para el acuífero superficial

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ion Cl^-
- Distribución de la concentración de ion NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$
- Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$

3.1.2.5. Cartografía temática . Mapas de isorrelaciones iónicaS

- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

ANEXO 3.1.3. Red de Control de la Hidroquímica Fase Sinoperacional (RCH-2003)

3.1.3.1. Resultados analíticos

3.1.3.2. Determinación de parámetros inestables

3.1.3.3. Caracterización

3.1.3.4. Cartografía temática. mapas de isocontenidos para el acuífero superficial

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ion Cl^-
- Distribución de la concentración de ion NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$
- Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$

3.1.3.5. Cartografía temática . Mapas de isorrelaciones iónicas



- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

3.1.3.6. Cartografía temática . Mapas de isovariaciones de isocoras e isorrelaciones iónicas entre 1999 y 2003

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ion Cl^-
- Distribución de la concentración de ion NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$
- Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$
- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

ANEXO 3.1.4. Puntos adecuados para la caracterización de ambientes. Fase postoperacional

3.1.4.1. Resultados analíticos

3.1.4.2. Determinación de parámetros inestables

3.1.4.3. Cartografía temática. Mapas de isocontenidos para el acuífero superficial

- Conductividad
- Hierro total
- Nitratos

3.1.4.4. Cartografía temática. Mapas de isorelaciones iónicas

- Nitratos/oxígeno disuelto
- Hierro total/oxígeno disuelto

ANEXO 3.1.5. Humedales del Complejo Coca-Olmedo

3.1.5.1. Inventario y tipificación

3.1.5.2. Resultados analíticos

3.1.5.3. Determinación de parámetros inestables

ANEXO 3.1.6. Perfiles hidroquímicos

ANEXO 3.2. SUELOS

ANEXO 3.2.1. Testificación detallada de los testigos de las perforaciones

ANEXO 3.2.2. Resultados analíticos

ANEXO 3.2.3. Ensayos granulométricos de las muestras de arena

3.2.3.1. *Curvas granulométricas*

ANEXO 3.2.4. Estudio textural. Observación con lupa binocular

3.2.4.1. *Documentación gráfica*

ANEXO 3.2.5. Estudio textural y composicional. Observación con microscopio de luz polarizada

3.2.5.1. *Documentación gráfica*

ANEXO 3.3. RESUMEN DE RESULTADOS DEL CÓDIGO PHREEQC DE MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.1.- INVENTARIO EXHAUSTIVO DE HUMEDALES

ANEXO 4.1.1. Inventario tabulado de humedales en la zona de estudio

ANEXO 4.1.2. Resumen gráfico

ANEXO 4.2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS HUMEDALES

ANEXO 4.2.1. Tabla general

ANEXO 4.2.2. Fotografías aéreas de los humedales y zona de influencia

ANEXO 4.3.- FICHAS DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4.4.- IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS Y CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4.4.1. Listados de identificación y chequeo de impactos

ANEXO 4.4.2. Fichas de caracterización inicial de los humedales en la zona de estudio. Laguna de las Eras, Laguna de la Iglesia y Laguna Caballo Alba

ANEXO 4.5.- APLICACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES

ANEXO 4.5.1. Indicadores medioambientales de presión

ANEXO 4.5.2. Indicadores medioambientales de estado

ANEXO 4.5.3. Indicadores medioambientales de respuesta

ANEXO 4.6.-POLÍGONOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA DEFINIR EL ESTADO INICIAL Y EVOLUCIÓN DE LOS HUMEDALES COMO CONSECUENCIA DE LAS OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL.

LISTADO DE ACRÓNIMOS EMPLEADOS¹

- ADENA, Asociación de Protección de la Naturaleza
- AEAS, Asociación española de Abastecimiento de agua y saneamiento
- AEMA, Agencia Europea del Medio Ambiente
- AENOR, asociación Española de Normalización y Certificación
- AGBAR, Aguas de Barcelona
- AGBAR, Sociedad General de Aguas
- AGE, Administración General del Estado
- AGRAR, Proyecto “*Augmenting Groundwater Resources by Artificial Recharge*”
- AH, Año hidrológico
- AIH, Asociación Internacional de Hidrogeólogos
- AOC, Carbono Orgánico Asimilable
- AOC, Carbono orgánico asimilable (*Hijnen & van der Kooij*, 1992)
- AR, Artificial Recharge
- ARF, Instalación para la Recarga de Acuíferos (*Aquifer Recharge Facility*)
- ASR, Sistema de almacenamiento y recuperación de agua de los acuíferos (*Aquifer Storage and Recovery*)
- ASTM, American Society for Testing and Materials
- BCV, Vehículo para la limpieza de la cuenca (*Basin Cleaning vehicle*)
- BEDLA, Buen Estado de las Aguas (*acrónimo sugerido en este trabajo*)
- BFR, Velocidad de generación de biofilm o “*Biofilm formation rate*” (*van der Kooij*, 1995)
- BFT, Test de paso del filtro o “*Bypass filter test*”
- BGS, *British Geological Survey*
- BOE, Boletín Oficial del Estado
- BOR, Boletín Oficial de la Rioja
- BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- CC, Capacidad de Campo
- CEC, California Energy Commission
- CEDEX, Centro de Estudios de Experimentación y Obras Públicas
- CENTER, Centro Nacional de Tecnología del Regadío
- CMA JA, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- COD (=DOC), Carbono Orgánico Disuelto
- COT (=TOC), Carbono Orgánico Total
- CSIR, Council for Scientific & Industrial Research (República Sudafricana).
- CSIRO, Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation
- CY-II, Canal de Isabel II
- CHD, Confederación Hidrográfica del Duero
- CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro
- CHESS”, HydroCHEmical SuStainability (Stuyfzand, 2002a)
- DBO, Demanda Bioquímica de Oxígeno
- DBPs Desinfección por productos químicos (Disinfection by Products)

¹ Nota: Aunque no existe una normativa clara al respecto, en este trabajo se ha optado por marcar los acrónimos sin punto entre cada sigla, al ser la tendencia más habitual en las editoriales en la actualidad (según comentarios verbales recibidos de correctores profesionales mencionados en el apartado de agradecimientos).



- DFID, *British Department for International Development*
- DM, Directiva Marco de las aguas (Directiva 2000/60/CE)
- DMA, Ácido Dimetilarstínico
- DMG, Dominio morfogenético
- DOCE, Diario Oficial de la Comunidad Europea
- DQO, Demanda Química de Oxígeno
- DRX, Difracción de Rayos X
- e.a., en adelante
- EDAR, Estación de Depuración de Aguas Residuales
- EEA, European Environmental Agency o Agencia Europea del Medio Ambiente
- EIA, Evaluación de Impacto Ambiental
- EMAS, Sistema de Gestión y Auditorías Medioambientales
- ENP, Espacio Natural Protegido
- ENPs, Espacios Naturales Protegidos
- EOI, Escuela de Organización Industrial
- EsIA, Estudio de Impacto Ambiental
- ETAP, Estación de Tratamiento de Aguas Potables
- FA, Función Aleatoria
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations
- GD, Groundwater depletion
- GIS, , Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information System*)
- GPS, Sistema de Posicionamiento Global (*Geographic Position System*)
- GS, Buen estado de las aguas (*Good Status*)
- GWRS Sistema de llenado de las aguassubterráneas (groundwater replenishment system)
- HCA, Hierarchical Cluster Analysis o análisis de grupos jerárquicos (Güler et al, 2002)
- HE, Ambiente Hidrogeológico (*Hydrogeologic Environment*)
- IAR, Recarga Artificial Inducida (*Inducted Artificial Recharge*)
- ICG, Índice de Calidad General
- ICONA, Instituto de Conservación de la Naturaleza
- ICP MS, Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente
- IGME, Instituto Geológico y Minero de España
- IMN, Instituto Nacional de meteorología del MIMAM
- IRYDA, Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario
- ISAR, International Symposium on Artificial Recharge, Adelaida (Australia), 2002
- ISARG, International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Orlando, Florida (USA), 1995
- ISMAR, International Symposium on Management of Aquifer Recharge, Berlín, (Alemania), 2005
- ITGE, Instituto Tecnológico Geominero de España
- IUCN, International Union for Conservation of Nature
- IV*, indicadores de vulnerabilidad
- JCL, Junta de Castilla y León
- Knosat, conductividad hidráulica de la ZNS o zona no saturada
- LA, Ley de Aguas (RDL 1/2001)
- LAM, Relación láser-masas
- LBAE, Libro Blanco del Aguas en España
- LBAS, Libro Blanco de las Aguas Subterráneas
- LIC, Lugar de importancia Comunitaria

- MAPA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
- MAR, Gestión de recarga de acuíferos (*Management on Aquifer Recharge*)
- MCA, Mapa de Cultivos y Aprovechamientos
- MDT, Modelo Digital del Terreno
- Mejoras Técnicas Disponibles o MTD
- MESTA, Honrado concejo de la MESTA de los pastores de Castilla.
- MFE, Mapa Forestal de España
- MFI, Índice de Fallo en Membrana
- MH, Riesgo de magnesificación
- MIMAM, Ministerio de Medio Ambiente
- MMA, Ácido Monometilarsónico
- MON, Materia Orgánica Natural
- MSNM, metros sobre el nivel del mar
- NMT, Nivel Medio del Terreno
- NWQG, Nacional Water Quality Guidelines (Australia) o recomendaciones para la calidad del agua nacional
- OCDE, Organización Cooperativa Desarrollo Empresarial
- OD (=DO), Oxígeno disuelto
- ONG, Organización no Gubernamental
- ORP, Potencial REDOX o Eh
- PAC, Política Agraria Común
- PERAA, Proyecto Europeo de Recarga Artificial de Acuíferos
- PHD, Plan Hidrológico de Cuenca del Duero (RD 1664/98)
- PHN, Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001)
- Pirsá, Primary Industries and Resources, South Australia
- PM, Punto de Marchitez
- PNR, Plan Nacional de Regadíos (RD 329/2002)
- PPB, Partes Por Billón
- PPM, Partes Por Millón
- PSI, Porcentaje de Sodio Intercambiable
- RBF, River Bank Filtration
- RCC, Red de Control de la Calidad
- RCP, Red de Control de la Piezometría
- RCR, Red de Control de la Recarga
- RCH, Red de Control de la Hidroquímica
- RDPH, Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 849/86 y RD 606/2003)
- RE, Recovery Efficiency o eficiencia en la recuperación
- ROCAS, Red Oficial de control de las Aguas Subterráneas
- RQA, Reacción química ajustada
- RTS-AR, Reglamentación Técnico-Sanitaria para las operaciones de Recarga artificial de acuíferos
- SAICA, Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas
- SAR, Relación de Absorción de Sodio
- SAT, Tratamiento suelo-acuífero (*Soil & Aquifer Treatment*)
- SEM, Microcopio electrónico de barrido
- SEPI, Sociedad Española de Participaciones Industriales
- THMs, Trihalometanos
- TISAR, Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Ámsterdam (Holanda), 1998
- TM, Término municipal



- TSD, Total de Sólidos Disueltos
- TSS, Total de Sólidos en Suspensión
- UAM, Universidad Autónoma de Madrid
- UE, Umbral de Escorrentía
- UH, Unidad Hidrológica
- UHA, Unidad Hidroambiental
- UHG, Unidad Hidrogeológica
- UHGm, Unidad hidrogeomorfológica
- UMG, Unidad morfogenética
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
- UNICEF, The United Nations Children's Fund
- UNTS, United Nations Treaty Collection
- USDA, Departamento de agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture).
- USEPA, United States Environmental Protection Agency
- uSL, Unidades SL o unidad de medida del índice de gradiente del Thalweg, (*Hack, 1973*)
- UUHH, Unidad Hidrogeológica (notación originaria)
- WC-DC Ciclos de umedad y secado (Wetting Cycle – Dry Cycle)
- WTF VA, Water Table Fluctuation, Volumétrico Algebraico
- WTF VE, Water Table Fluctuation, Volumétrico Estadístico
- WTF, Fluctuación del nivel del agua (*Water Table fluctuation*)
- ZEPA, Zona Especial de Protección de las Aves
- ZFP, Plano de Flujo Nulo (*Zero Flux Plane*)
- ZNS, Zona No Saturada
- ZRA, Zona de restricción absoluta
- ZRM, Zona de restricción máxima
- ZRm, Zona de restricción moderada
- ZS, Zona Saturada

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN CUENCAS FLUVIALES. ASPECTOS CUALITATIVOS Y MEDIOAMBIENTALES. CRITERIOS TÉCNICOS DERIVADOS DE LA EXPERIENCIA EN LA CUBETA DE SANTIUSTE (SEGOVIA)

MEMORIA

I. AGRADECIMIENTOS

Al tratarse de un proyecto realizado con bastante ilusión y esfuerzo, pero escaso presupuesto, este apartado puede resultar excesivamente largo gracias a la enorme ayuda recibida de tantos colegas y amigos.

Sin ánimo de dejar a nadie en el tintero, aunque con el temor de que esto ocurra, quisiera manifestar mi agradecimiento a mis directores, Manuel García (Universidad Alfonso X El Sabio) y Fermín Villarroya [Universidad Complutense de Madrid (en adelante UCM)], principales copartícipes en este empeño, compañeros en lo bueno y en lo malo y sufridores muchas veces de mi obstinación. Así mismo, a los profesores y compañeros del programa de doctorado de la UCM; a los técnicos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) Ramón Galán y Manuel Álvarez Chaín; y del Grupo Tragsa, a Antonio Hernández Ponce, Alberto García y Juan Martínez, quienes han facilitado el acceso a ciertos datos precisos para el desarrollo del trabajo.

No quisiera olvidar a los habitantes de la *Cubeta* que, con sus testimonios, encuestas y “visitas guiadas”, nos han permitido adquirir el grado de conocimiento necesario, como Víctor Sarabia, Pablo Herrero, Ana M.^a Herrero, Juan J. Cubero, Ramiro Gutiérrez, etc.

Muchas gracias por la ayuda en la toma de datos y acaloradas discusiones sobre su interpretación a mis compañeros del Grupo Tragsa, especialmente a Carlos Ruíz, Pedro Ruano, Rocío Martínez, Antonio Albarracín, Ulyses Palomino, Ana Piedra, Inmaculada Prieto, Carlos Copano, Óscar García y más nombres que mi hálito desagradecido recordará cuando sea demasiado tarde para que quede aquí escrito.

La asistencia al International Symposium on Artificial Recharge (ISAR 4) marcó “*un antes y un después*”, ya que fue ahí donde consolidé la decisión de orientar mi formación futura a temas de recarga artificial de acuíferos. Muchas gracias por el ánimo transferido por Peter Dillon [Centre for Groundwater Studies (CGS) de Adelaida], quien además me facilitó valiosa información; a Stephanie Rinck Pfeiffer, del Vivendi Water Deutschland (GMBH) y a Judith Sievers, de la Universidad Libre de Berlín, por alentarme a seguir adelante con lo que era el esbozo de este trabajo y por sus dosis de entusiasmo. También a las discusiones de sobremesa y posteriores comunicaciones con los amigos del simposio: Gabriel de los Cobos, del Service Cantonal de Géologie de Ginebra; Giovanni Pranzini, del Dipartimento di Scienze Terra de la universidad de Florencia; Michael



Lacroix, del Centre de Recherches Geodynamiques de Francia; Uwe Tröger, de la Universidad de Tecnología de Berlín; y José Antonio de la Orden, del IGME.

En temas concretos he contado con la ayuda, siempre desinteresada, de Julio López, del IGME, para problemas relacionados con la tectónica y geología general. Los problemas de interacción agua-roca fueron supervisados por Belén Buil, del CIEMAT, quien, en ocasiones, ha hecho las veces de codirectora. El tema “*suelo*” ha sido posible gracias a la pericia de María Ochoa puliendo láminas delgadas, a la simpatía y esfuerzo de Rosa Babín y Ana Buades, por poner medios a mi alcance, especialmente un microscopio Nikon de luz polarizada y una lupa binocular Olympus.

José M^a. Rey Benayas, profesor de la universidad de Alcalá de Henares y excelente conocedor del acuífero de los Arenales, me presentó nuevas técnicas para encajar mi estudio, de ámbito local, en el ámbito regional.

El medio ambiente, quizás el problema más difícil de acometer, ha contado con la colaboración de Marina González y Elena García para la identificación de impactos, y la supervisión de José María García, todo un erudito en diseñar indicadores medioambientales.

El telón de fondo de los problemas de colmatación lo conseguí entender gracias a la tesis y ayuda de Alfredo Pérez-Paricio, de la Agencia Catalana de l’Aigua.

El corolario de normas técnicas para la recarga artificial se lo debo a las publicaciones de los simposios TISAR 3 e ISAR 4, que me han permitido adquirir conocimientos precisos para intentarlo.

El arduo asunto de la educación ambiental ha sido viable gracias a Rosa Cordero, auténtico motor en períodos de desánimo. Ha sido la persona que me ha hecho ver de cerca la importancia de la sensibilización previa a un cambio drástico, como puede ser la incorporación de la técnica de recargar acuíferos a la sociedad española, desde la enseñanza primaria a los foros técnicos y grupos ecologistas. También me ha ayudado a creer que esta “*utopía*” pueda ser una realidad inminente.

La revisión del texto ha contado con la ayuda de José Cordero y el diseño gráfico, maquetación e imposición con la de Fernando Poza y Carlos Navia, de Grafinat.

Tampoco quisiera olvidar la ayuda invisible de tantos compañeros “de pasillo”, quienes de un golpe de vista han localizado la salida de problemas laberínticos, como Esther y Mairena Fernández, Guillermina Garzón, Julio Garrote, Ana Pividal, Ricardo Palomino (UCM), Javier Yélamos (UAM), Luis Galán (IGME), etc.

Y para terminar (o casi, ya que mis agradecimientos empiezan y terminan por mi familia), apuntar la compañía en horas de gabinete de un incansable reproductor de MP3 y unos litros de té. Así mismo, a los bares Las Chicas, de Santiuste, y La Muralla, de Coca, a tres coches con alma, una cámara digital, un GPS y varias maletas de cacharros de hidroquímica, compañeros inseparables en el campo.

A todos ellos mi más sincero y afectuoso agradecimiento. Os debo otra.

II. PRÓLOGO

“El hombre debe hacer constantemente recapitulación de su experiencia y continuar descubriendo, inventando, creando y progresando. Hoy en día, la capacidad del hombre de transformar lo que le rodea, utilizada con discernimiento, puede llevar a todos los pueblos los beneficios del desarrollo y ofrecerles la oportunidad de ennoblecer su existencia. Aplicando errónea o imprudentemente, el mismo poder puede causar daños incalculables al ser humano y a su medio. A nuestro alrededor vemos multiplicarse las pruebas del daño causado por el hombre en muchas regiones de la Tierra: niveles peligrosos de contaminación del agua, el aire, la tierra y los seres vivos; grandes trastornos del equilibrio ecológico de la biosfera; destrucción y agotamiento de recursos insustituibles y graves deficiencias, nocivas para la salud física, mental y social del hombre, en el medio por él creado, especialmente en aquél en que vive y trabaja.”

Declaración de Estocolmo sobre el Medio Humano.

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano,
reunida en Estocolmo del 5 al 16 de junio de 1972.

La recarga artificial de acuíferos es una técnica concebida para la infiltración de agua en los acuíferos. Ésta se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica de gran efectividad y bajos costes con respecto a las grandes obras hidráulicas. En España se trata de una técnica todavía incipiente, en ocasiones desconocida, que hasta la fecha ha recibido escasa consideración por parte de la administración hidráulica del país.

En este trabajo de investigación se pretende valorar el grado de conocimiento de la técnica de la recarga artificial de acuíferos en la sociedad española, y aportar un “granito de arena” para que esta técnica, todavía alternativa, “especial” y casi desconocida, comience a formar parte de la idiosincrasia española.

Para ello se han analizado diferentes aspectos de la recarga artificial de acuíferos, en especial hidrogeológicos, cualitativos y medioambientales, que confluyen en un nodo común: la recarga artificial, a pesar de ser una técnica relativamente joven, se perfila como una de las alternativas hídricas de vanguardia con gran futuro, junto con la desalación, y cabe esperar que vaya logrando cada vez mayor peso en la sociedad española.

Además de los usos “tradicionales”, se perfila como una técnica para la recuperación de enclaves naturales y ENP² degradados por efecto de las extracciones de aguas de los acuíferos. De este modo, dichos espacios podrían recuperar el valor contingente que algún día tuvieron.

Como ejemplo del grado en que es tenida en cuenta la recarga de acuíferos y los humedales en la sociedad española, se presenta un breve resumen del análisis léxico-gráfico realizado, que ha estado basado en el análisis del número de veces que la palabra “recarga artificial” o “humedal” aparece citada en la legislación vigente más actual en materia de aguas. El resultado de este estudio, que se desarrolla en el Bloque 1 de la

² Espacios Naturales Protegidos. Los acrónimos empleados son de aceptación general y aparecen listados al inicio del preámbulo.

Memoria (antecedentes legales), concluye que las disposiciones legales analizadas contemplan escasamente la recarga artificial, habiendo más citas en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (tres), que en la Ley de aguas, con una sola cita.

Algunos autores han manifestado en distintos foros ponencias relativas a la aplicación de la recarga artificial en España, destacando opiniones relativas a la *“falta de confianza en esta tecnología, muy probablemente por desconocimiento de sus potencialidades”* (Fernández Rubio, 2001), o *“la tendencia a sobreaprovechar los recursos superficiales”* (Villarroya, 2002). Mientras, algunos ejemplos europeos y norteamericanos, bien conocidos por la Administración General del Estado [en adelante (=e.a) AGE], avalan su efectividad. El próximo párrafo, relativo a la recarga artificial, ha sido extraído del LBAE (MIMAM, 2000b): *“Los resultados obtenidos en estas experiencias son esperanzadores, aunque se han producido algunos fracasos que han sido fruto tanto de una falta de planificación y tecnología, como de un interés insuficiente por sus posibles beneficiarios, y escasa aportación económica para desarrollarlas.”*

Ante tal panorama, se ha desarrollado el presente trabajo que, entre otras cuestiones, analiza las ventajas e inconvenientes de aplicar la recarga artificial superficial en cuencas fluviales, bien sea mediante acequias, canales, embalses, inyección de pozos, riego o recarga estimulada. Se analiza, además, su empleo como herramienta de gestión, así como la evolución cualitativa de las aguas subterráneas tras operaciones de recarga artificial, con objeto y dentro del contexto de caminar hacia el *“Buen Estado De Las Aguas”* [término para el que, cordialmente, se ha empleado la abreviatura *“BEDLA”*³ o *GS* (*Good Status*)] antes del año 2015, que es el plazo fijado en la Directiva 2000/60/CE para alcanzar tal fin en los Estados miembros; y por último, la idoneidad de esta técnica para ser empleada en la recuperación de humedales hidrodependientes.

El estudio se ha apoyado en las experiencias obtenidas en un “laboratorio natural” en el que el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (en adelante MAPA) ha iniciado una de las primeras actuaciones de recarga artificial de cierta envergadura de España: la Cubeta⁴ de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia), en el acuífero de *Los Arenales*, UU.HH. 02-17.

En ella se han realizado estudios concretos y obtenido conclusiones que permiten extrapolar las experiencias a escenarios análogos de la Península Ibérica. Estos estudios han sido comentados y ampliados en la presente tesis doctoral, analizando los pros y contras de aplicar esta técnica en aras del desarrollo sostenible, y centrando su aplicabilidad medioambiental para la regeneración hídrica de humedales alterados.

La estructura de los Bloques se presenta en la Fig 1.01. Se trata de un esquema indicativo de que la recarga artificial de acuíferos puede ser desglosado en varios bloques que soportan la actividad, bloques disociados pero interrelacionados entre sí.

³ Si bien el acrónimo “BEDLA” o “GS” no ha sido encontrado en los antecedentes consultados, en los apartados posteriores será utilizado respetuosamente para definir uno de los principales objetivos de la Directiva 2000/60/CE, que es alcanzar el “Buen Estado de las Aguas” antes del año 2015.

⁴ La “Cubeta” se ha adoptado como un topónimo que se refiere a la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista en el desarrollo de este trabajo.



Fig. 1.01. En este esquema operativo, las operaciones de recarga artificial o AR se interpretan como un conjunto de bloques que unos se soportan a otros, quedando el objetivo final siempre inacabado. El conocimiento general y específico del medio soporta los aspectos cuantitativos y cualitativos de la recarga artificial, dotando a la actividad de gran utilidad práctica que es dirigida a aspectos medioambientales, ingeniería ambiental, diseño de dispositivos, etc. El proceso concluye con la divulgación y planificación de campañas de educación ambiental, dejando una línea abierta para futuras investigaciones.

Para ello se define con el grado de detalle preciso el marco de referencia empleado como “*laboratorio natural*” en los estudios de hidrogeología. Los estudios de hidrogeoquímica medioambiental han requerido ampliar la zona de estudio al Complejo de humedales de Coca-Olmedo (Segovia-Valladolid), que en adelante será designado “*el Complejo*”. Los estudios han sido complementados con los análisis realizados en los laboratorios e instalaciones de la UCM.

Para terminar el prólogo, cabe mencionar que en determinados círculos del país la recarga artificial está adquiriendo una importancia creciente y se enclava en el punto de mira como una herramienta de gestión hídrica de primer orden. Esperemos que nuestros gestores tengan a bien analizar esta alternativa antes de que sea demasiado tarde.



Figs. 1.02.a) y b). La recarga artificial de acuíferos empieza a pasar de ser una “técnica especial” a una alternativa sólida, razonable y de gran futuro en la gestión hídrica del país. Este tránsito, aunque lento, empieza a ver sus dispositivos y actuaciones funcionando en el país. Dispositivo de Santiuste de san Juan Bautista y caz experimental de Villeguillo (Segovia).

III. INTRODUCCIÓN GENERAL

La recarga artificial de acuíferos (en adelante AR⁵ o MAR⁶) se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo, como pueden ser Holanda, USA, Australia, etc.

En el ámbito de España, esta técnica está infrautilizada, se encuentra todavía en un estadio incipiente o experimental, y, hasta ahora, apenas ha recibido consideración por parte de la administración hidráulica del país.

A pesar de haber existido antecedentes de recarga artificial en España, al menos desde la época árabe, como son los *careos* alpujarreños o el sistema de diques y boqueras levantinos (Díaz-Marta, 1989), las primeras instalaciones modernas no comenzaron su andadura hasta los años 60, en los aluviales de los ríos Besós y Llobregat (Custodio y Llamas, 1983).

Desde 1984 el IGME ha desarrollado actividades, en general en forma de experiencias piloto (IGME, 2000d).

El volumen anual medio de recursos hídricos resultantes de operaciones de AR en España asciende a 300-350 hm³/año (IGME, 2000d). Esta cifra está en desacuerdo con la estimación realizada por el Ministerio de Medio Ambiente, según el cual “*la cuantía total de recursos destinados de forma regular a recarga artificial en España es de difícil estimación, pero no debe alcanzar siquiera los 50 hm³/año*” (MIMAM, 2000b, p. 170). Si bien, la misma fuente considera que los resultados obtenidos en estas experiencias son esperanzadores.

Algunos de los obstáculos que encuentra la AR en este país para su desarrollo, de acuerdo con Pérez Paricio (2000), son:

1. El grado de conocimiento de su potencial, posibilidades, condicionantes y limitaciones es incipiente.

⁵ **AR:** Artificial Recharge. Se trata del acrónimo más empleado en foros internacionales de recarga artificial y en internet junto con “MAR.” Se ha encontrado en tantas citas y documentación que, finalmente, y con el objetivo de homogeneizar, se ha optado por emplear el término en las alusiones a “recarga artificial” a lo largo de todo el trabajo, a pesar de ser un acrónimo sajón.

⁶ **MAR:** Este término tiene su origen en el grupo de trabajo para el estudio de operaciones de recarga artificial fundado por la AIH en 1998 dirigido por Mr. Ivan Johnson, consultor del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), activista con más de 30 años de experiencia en investigación y desarrollo (I+D) y director del ASCE/EWRI (Standards Committee for Artificial Recharge). El grupo celebró su primera reunión en noviembre de 2000 con motivo del 30 aniversario de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH). En tal acontecimiento se decidió modificar el término *AR* (*Artificial Recharge*) para referirse a operaciones de recarga artificial, por *MAR* (Management of Aquifer Recharge) o gestión de la recarga de acuíferos, incorporando los procesos naturales de recarga y configurando una herramienta vital para el desarrollo sostenible de los recursos hídricos del planeta.

2. Visión principalmente hidráulica de la política relativa a la gestión de los recursos hídricos en el país, dejando relegados a un segundo plano alternativas como son la reutilización, gestión de la demanda, y por supuesto la AR, designadas como “*técnicas especiales*” en el Programa de Actualización del Inventario Hidrogeológico (PAIH) del MIMAM, capítulo 5, donde alude a la recarga artificial en la cuenca del Duero.
3. Escasez y falta de continuidad en las experiencias realizadas hasta la fecha, que en muchas ocasiones, ha estado en el ámbito de investigación. Las operaciones realizadas por el MAPA a este respecto van cobrando importancia creciente, si bien, la primera actuación de gran relevancia ha sido en el año hidrológico 2002-2003.
4. Escasa dedicación y tratamiento en las publicaciones de mayor divulgación de la gestión hídrica del país, como son los textos del Libro Blanco de las Aguas Subterráneas, LBAS, (*MOPTMA-MINER, 1994*), el Libro Blanco del Aguas en España, LBAE, (*MIMAM, 2000b*), etc.

Un método efectivo para combatir los obstáculos mencionados, consiste en la difusión de experiencias e investigaciones de programas multidisciplinarios de carácter científico-técnico, de manera planificada y rigurosa (*Pérez Paricio, 2000*).

Es precisamente en este contexto donde se cimenta la filosofía y motor de la realización de la tesis doctoral que aquí se presenta, comprobar la efectividad de la técnica y estudiar sus ventajas e inconvenientes en un *laboratorio experimental natural*, empleando para ello todos los recursos disponibles, especialmente las instalaciones y laboratorios de la UCM y la experiencia del MAPA.

La zona cuenta con abundante literatura hidrogeológica gracias a las actuaciones que lleva a cabo la Dirección General de Desarrollo Rural del MAPA, que dispone de series de datos de piezometría y calidad de duración superior a cuatro años.

Tras el primer año de recarga artificial, hay evidencias técnicas para pensar que la experiencia puede ser considerada satisfactoria, aunque mejorable.

El fin último es aportar una serie de criterios y herramientas de decisión con las que poder planificar directrices en proyectos futuros que contemplen aspectos de cantidad y calidad, basadas en la recarga artificial superficial e inducida, dentro de un proceso de búsqueda de un compromiso por parte de la Administración General del Estado (AGE) para que las operaciones de AR dejen de ser “*técnicas especiales*” y pasen a ser meras técnicas habituales.

Por último, mencionar que en el desarrollo de esta tesis doctoral se ha prestado una especial atención al respeto a los derechos de autor y de protección de datos de carácter personal. Todas las figuras, tablas y fotografías tienen mención expresa de su autoría, y, en caso de carecer de ella, corresponden al autor de esta tesis.

IV. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio se presenta como última etapa del tercer ciclo del programa de estudios de Doctorado que promueve e imparte el Departamento de Geodinámica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM.

El desarrollo del trabajo es unipersonal, siendo el autor del mismo A. Enrique Fernández Escalante, bajo la dirección de los profesores D. Manuel García Rodríguez, profesor titular de la Facultad de Ciencias de la Universidad Alfonso X El Sabio, y D. Fermín Villarroya Gil, del Dpto. de Geodinámica de la Facultad de CC. Geológicas de la UCM.

La tesis desarrolla la línea iniciada y presentada en el trabajo de obtención a la Diplomatura de Estudios Avanzados (DEA), *“La recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia). Estudio de las condiciones de referencia, funcionamiento hidrogeológico y aspectos medioambientales relacionados”*, defendido en la Facultad de CC. Geológicas el 3 de julio de 2002. En aquella ocasión fue presentado un sumario de la actual tesis doctoral.

Esta temática se justifica por la inquietud personal del autor sobre los procedimientos y metodologías tendentes a alcanzar el término que respetuosamente ha sido designado “BEDLA” o “GS” según se ha justificado con anterioridad. Este término, acuñado en la Directiva Marco del agua (DM), representa una meta a conseguir en el horizonte 2015 por los Estados miembros, y, desde el punto de vista del escritor, todos los técnicos y personas preocupadas por su alcance con mentalidad medioambiental conservacionista y activa deben contribuir a su logro.

En este contexto se presenta esta tesis doctoral, con la que se pretende proponer y comprobar una serie de técnicas modernas que sean apropiadas para corregir o minimizar impactos medioambientales negativos en las aguas subterráneas, tanto en sus aspectos cuantitativos como cualitativos para el horizonte 2015. Así mismo, restaurar humedales degradados y otros enclaves de valor ecológico relacionados, empleando la recarga artificial de acuíferos como herramienta para estos fines.

Con objeto de posicionar mejor la zona de estudio, esta queda ubicada en el sector meridional central de la cuenca del Duero, especialmente en el sector suroccidental de la provincia de Segovia, si bien la zona de estudio comprende una pequeña extensión vallisoletana.

V. OBJETIVOS

Los objetivos trazados se basan en un procedimiento secuencial, en el que todas las etapas se basan en la anterior y apoyan la siguiente, enmarcados en la propia concepción inherente al desarrollo de una tesis doctoral.

Se plantean una serie de propósitos para contribuir al conocimiento de la Cubeta de Santiuste en aquellos aspectos menos desarrollados y que no están previstos desarrollar por parte de la Administración con prontitud, especialmente desde su dimensión hidrogeológica y ecológica.

En cuanto al estudio de antecedentes, se pretende ampliar ciertos aspectos ya estudiados por otros autores o aportar nuevos enfoques.

No es deseo del autor y directores solapar la investigación con trabajos paralelos llevados a cabo por la Administración u otras empresas, y todos aquellos datos empleados para la consecución de los fines pretendidos tendrán constancia expresa de la fuente y titularidad.

Algunos de los objetivos inicialmente planteados, desglosados por bloques, son:

• Bloque 1

- Presentar el estado de la cuestión de la recarga natural sobre una base teórica seria lo más exhaustiva posible.
- Conocer la problemática de la colmatación.
- Estimar el grado de consideración que la técnica de la recarga artificial tiene en el resto del mundo.
- Recopilar y comentar de forma crítica todos los antecedentes posibles.
- Conocer el marco legal de la recarga artificial en el estado español.

• Bloque 2

- Profundizar en el conocimiento hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste, laboratorio experimental donde se han estudiado la mayoría de los agentes y procesos involucrados en el proyecto de investigación.
- Aportar nuevas metodologías de conocimiento aplicables a zonas donde se llevan a cabo operaciones de recarga artificial.
- Describir el dispositivo y la experiencia tras un ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste, así como analizar la efectividad de los dispositivos en aras a su mejora.

- **Bloque 3**

- Caracterizar hidroquímicamente las aguas subterráneas de la *Cubeta* en tres fases consecutivas: preoperacional, sinoperacional y postoperacional.
- Caracterizar hidrogeoquímicamente los suelos presentes en la *Cubeta*.
- Conocer las principales pautas de reacción en las condiciones geoambientales del sistema objeto de estudio y prever la evolución cualitativa de las aguas por efecto de las operaciones de AR.
- Averiguar las reacciones químicas predominantes en los distintos contextos y escenarios de zonas donde se llevan a cabo operaciones de AR, con objeto de actuar sobre el acuífero mediante técnicas de tratamiento de suelo y acuífero o SAT (*Soil Aquifer Treatment*).
- Establecer unos estándares de calidad de las aguas de recarga muy rigurosos, cuyos límites serán dependientes de las condiciones geoambientales y de la tipología del acuífero.

- **Bloque 4**

- Conocer e inventariar los humedales presentes en la zona de estudio en el pasado, antes de la influencia del regadío.
- Proponer un sistema de clasificación de humedales que refleje su idoneidad para aplicar operaciones de recarga artificial inducida, al no haber sido detectado ninguno en el estudio de antecedentes.
- Caracterizar los humedales del sistema mediante un sistema específico de elaboración propia compuesto por varios elementos descriptivos y parámetros artificiales.
- Diseñar un variograma dinámico que refleje aspectos cuantitativos, cualitativos, evolutivos, ecológicos, de los humedales caracterizados que esté cimentado en un sistema de rangos-pesos sobre un diagrama parametrizado.
- Elaborar un decálogo o una serie de normas prácticas relacionadas con la elaboración o diseño de un programa de vigilancia y control de un sistema de recarga, especialmente en cuanto a su relación con los espacios naturales protegidos y zonas húmedas en general.

- **Bloque 5**

- Diseñar y emplear técnicas SAT que permitan alcanzar los siguientes objetivos:
- Alcanzar el punto óptimo o teórico de funcionamiento en las instalaciones de recarga con un mínimo coste. Estudiar las causas que provocan el alejamiento del punto óptimo en las instalaciones de recarga.



- Alcanzar una metodología que conlleve una mejora cualitativa de las aguas subterráneas y de los procesos contaminantes previos, con incidencia sobre los vectores biológicos. También estudiar qué causas inciden negativamente en la calidad de las aguas, especialmente tendiendo a la determinación de sinergismos que no dejen lugar a dudas a la hora de determinar el riesgo o peligrosidad de contaminación de las aguas subterráneas.
 - Analizar la dificultad de gestionar un sistema de recarga inducida con excedentes hídricos de la época lluviosa, las alternativas a la escasa disponibilidad de agua para su aplicación y presentar alternativas de actuación.
 - Diseño de estructuras para minimizar la evapotranspiración y colmatación, así como que permitan llevar a cabo labores de descolmatación de los poros, fisuras e intersticios. Así mismo, diseño de estructuras que permitan la recarga artificial superficial con escasa disponibilidad de terreno por carestía del mismo, cultivos, dificultades orográficas, climatología extrema (congelación del suelo), etc. Y que tengan una vida útil suficientemente alta para obtener una alta rentabilidad.
- **Bloque 6**
- Estudiar y presentar ciertos criterios de educación ambiental, sensibilización y divulgación de la recarga artificial y de las metodologías desarrolladas.
 - Proponer una serie de líneas de investigación para posteriores proyectos de investigación que desarrollen la técnica.

VI. HILO ARGUMENTAL

En este apartado se presenta el “hilo conductor” propuesto para la presentación de los distintos estudios abordados en este trabajo de investigación, en un intento de exponer y ordenar la información de forma clara y coherente.

Parte de este apartado puede ser considerado metodológico, no obstante, ha sido disociado del apartado “materiales y métodos” con objeto de facilitar una guía del orden de desarrollo de los distintos bloques.

El objetivo principal es encarar una visión actual hidrológica, hidrogeológica y ecosistémica de la Cubeta de Santiuste, y por ende, de todos aquellos escenarios análogos, empleando para ello todas las técnicas y herramientas que ha sido posible.

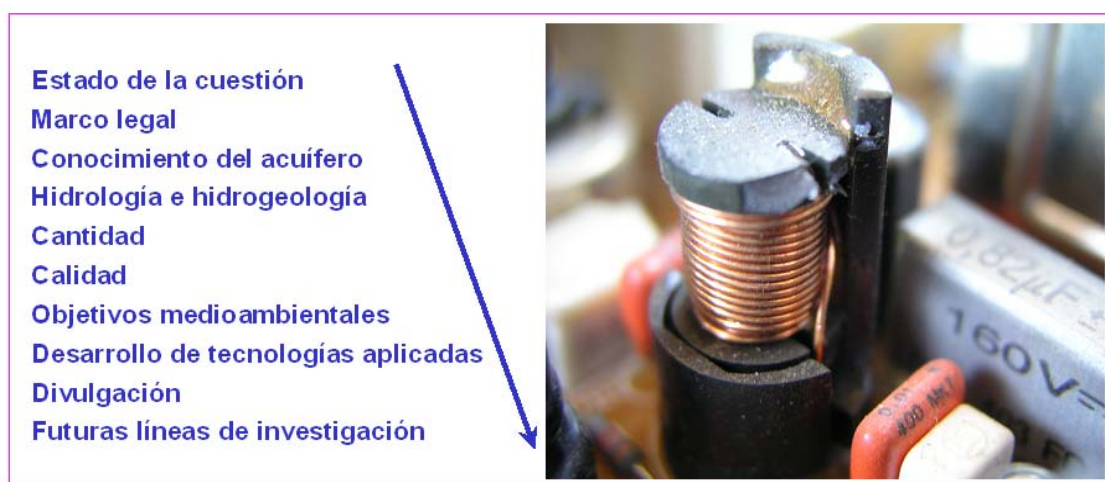


Fig. 1.03. Hilo conductor. El tratamiento del tema de la recarga artificial de acuíferos pasa por varios apartados tales como la presentación del “estado del arte”, el marco legal que regula la actividad, el conocimiento del acuífero empleado como “laboratorio experimental”, el conocimiento cuantitativo y cualitativo del medio antes, durante y después de la recarga, el empleo de la técnica para objetivos medioambientales y el desarrollo de tecnologías aplicadas para mejorar la efectividad de los sistemas, fomentando además su divulgación y dejando la puerta abierta para el desarrollo de futuras líneas de investigación.

Para ello se plantean una serie de actuaciones basadas en cierto modo en la disponibilidad de nuevas técnicas y herramientas, descritas en el próximo apartado.

Los *bloques*, entendidos como unidades de presentación, constituyen pequeños trabajos de investigación independientes, y será su unión e interacción lo que posibilite alcanzar una serie de conclusiones operativas.

El desarrollo secuencial consta de seis bloques, estructurados, a su vez, en varios apartados por motivos operacionales.

El **primer Bloque** ha sido titulado “**Contextualización: la recarga artificial. Ciencia y legalidad.**” En él se presenta un esbozo del grado de desarrollo de la recarga natural y artificial en el mundo, elaborado a partir de un análisis de documentación

exhaustivo. Especial tratamiento ha recibido el problema de la colmatación, al tratarse del impacto que afecta con mayor intensidad a las estructuras de recarga artificial.

Posteriormente, son analizados y comentados los antecedentes técnicos y legislativos presentes en la literatura hidrogeológica y jurídica.

Y, por último, se describe la zona de estudio, donde se ha realizado un profundo estudio hidrogeológico base para estudios posteriores específicos de recarga artificial. Asimismo se presentan aspectos físicos y antrópicos.

Se trata de un Bloque donde se recopila y analiza una gran cantidad de información, si bien las aportaciones propias son reducidas.

El **segundo Bloque** se denomina “*Contribuciones al conocimiento del acuífero.*” En él se estudian las “*condiciones de referencia*” centrándonos en aspectos escasamente conocidos hasta la fecha, con especial hincapié en la geología general y estructural, sedimentología, aspectos geomorfológicos vinculados a la actividad tectónica, geometría tridimensional del acuífero, comportamiento hidrogeológico, hidroestratigrafía, hidrología superficial, actualización del balance hídrico global y sectorizado, cartografías y perfiles hidrogeológicos, etc.

Una vez conocidas las “*condiciones de referencia*” se aborda la experiencia de la recarga artificial en la zona de estudio o “*AR en la Cubeta de Santiuste.*” Para ello se lleva a cabo una detallada descripción técnica y análisis crítico del dispositivo de recarga, elaborando una memoria de la AR durante el año hidrológico 2002/03. Se describe además la red de control de la Recarga (RCR) diseñada para el seguimiento de la recarga.

Tras adquirir todos los datos precisos, se justifica la técnica elegida para evaluar la *AR* en el año hidrológico 2002/03, estudiando la efectividad del primer ciclo de actividad y la influencia de factores externos.

Como complemento, se ha elaborado una cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo o regional, terminando un contexto que da pie a la presentación de una serie de consideraciones cuantitativas deducidas de la experiencia.

Para terminar, se ha establecido una división de la zona de estudio en unidades homogéneas, proponiendo un término específico designado “*Unidad Hidroambiental*”.

El **tercer Bloque** se titula “*Objetivo BEDLA (en alusión al Buen Estado de las Aguas). Aspectos cualitativos de la interacción agua-suelo.*” El término se ha adoptado del acrónimo “*Buen Estado de las Aguas*” o “*Good Status*”, acuñado por la Directiva 2000/60/CE como objetivo a cumplir por los Estados miembros en el horizonte 2015.

En él se lleva a cabo una caracterización de las aguas subterráneas y del suelo del acuífero, estudiando los procesos de interacción agua-suelo y deduciendo una serie de ambientes hidrogeoquímicos, determinando así las principales reacciones químicas que acontecen en el acuífero por efecto de la recarga artificial, elaborando previsiones y adquiriendo la experiencia precisa para el posterior diseño de técnicas de máxima efectividad con mínimo impacto.

El **cuarto Bloque** ha sido designado “*Medio ambiente y recarga artificial. Aspectos medioambientales relacionados.*” El Bloque aborda la problemática de los humedales degradados en la zona de estudio y en la Península Ibérica, cuestionando la técnica de la recarga artificial inducida como una metodología apropiada para la recuperación ecosistémica de los mismos.

Como etapa intermedia se ha estudiado el “estado actual” identificando los agentes y procesos desencadenantes del desequilibrio hídrico y realizando un inventario de humedales y proponiendo un sistema de clasificación específico.

El desarrollo del Bloque guarda cierta consonancia con los contenidos básicos de un estudio de impacto ambiental, inspirados parcialmente en el artículo 2 de la Ley 6/2001 de 8 de mayo, de Evaluación de Impacto Ambiental.

En el tema se aplican criterios de ingeniería ambiental, diseñando un sistema de indicadores específico, así como un polígono de evaluación multicriterio basado en un sistema de rangos-pesos parametrizado para la evaluación y seguimiento ambiental.

El **quinto Bloque** ha sido titulado “*Proposición de técnicas de tratamiento suelo-acuífero (SAT).*” En este Bloque, de carácter eminentemente práctico, se estudian diversas técnicas SAT que podrían ser aplicadas en la cubeta de Santiuste de acuerdo con el grado de conocimiento alcanzado en los bloques precedentes. En general, se analizan distintas alternativas aplicables en cada situación concreta relativas a los aspectos cuantitativos y cualitativos del agua a recargar, posibles actuaciones sobre el medio receptor y diseño de los dispositivos de recarga.

Se estudian además aspectos relativos al diseño de programas de vigilancia y control en dispositivos de AR, de un código de buenas prácticas en el sistema de recarga y de parámetros de gestión.

El **sexto y último Bloque** se ha designado “*Contribuciones a la educación ambiental. Propuesta de futuras líneas de investigación.*”

En él se desarrollan algunas directrices para la educación ambiental de la recarga de acuíferos, entendiendo por esta la filosofía de la divulgación más que la divulgación en sí. Por último se citan ciertos aspectos insuficientemente conocidos que pueden constituir futuras líneas de investigación.

Cada bloque se estructura en apartados, que se ajustan al siguiente esquema, si bien los títulos no son siempre coincidentes en aras de la expresividad:

- Introducción y objetivos
- Materiales y métodos
- Estado de la cuestión
- Toma de datos
- Discusión / Resultados
- Resumen y/o conclusiones del bloque

En la Fig. 1.04 se esboza el hilo argumental a desarrollar:

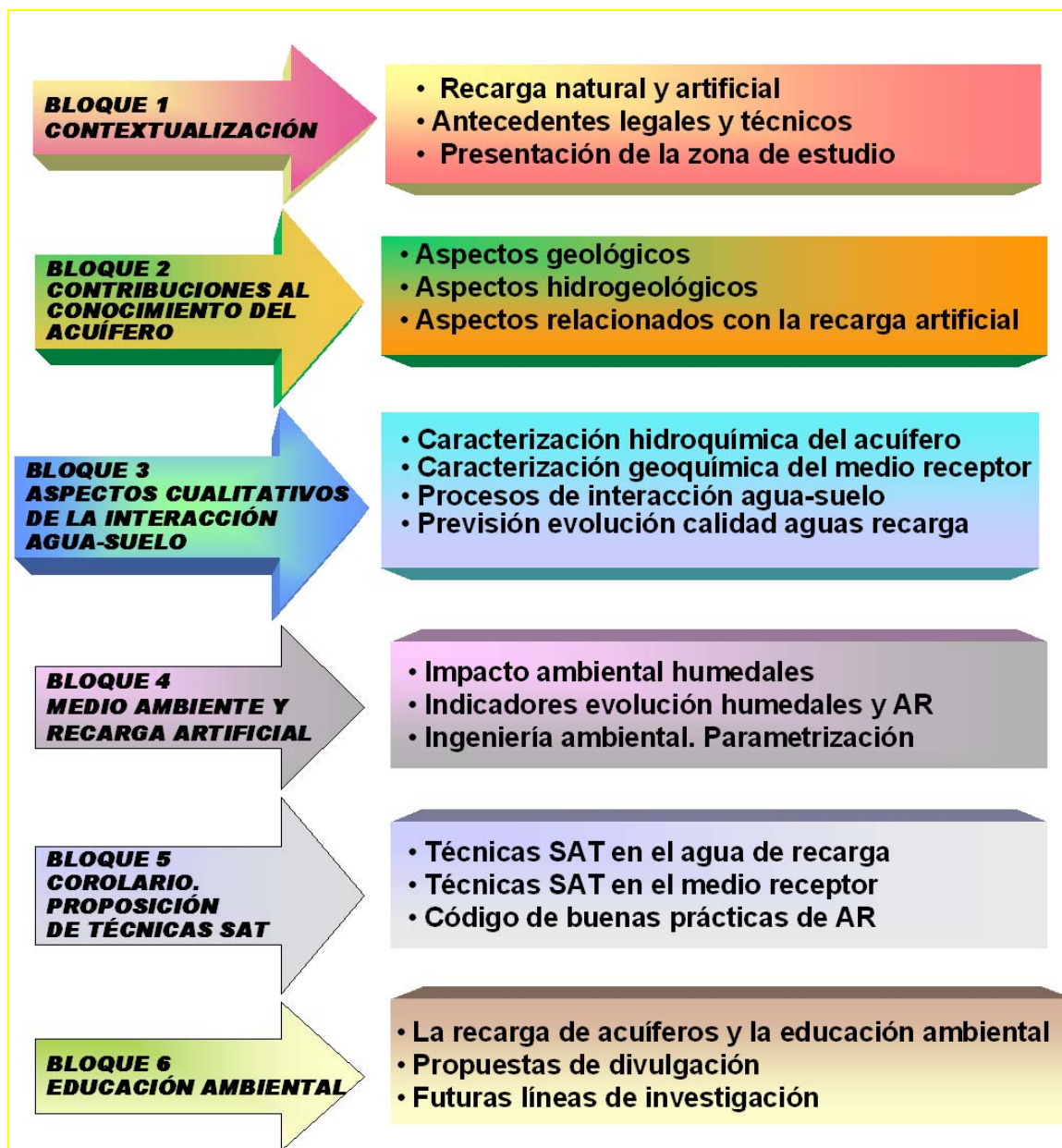


Fig. 1.04. Esquema del “hilo argumental”, guía empleada para presentar los estudios realizados en el presente trabajo de investigación.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS COMUNES

En este apartado se presentan algunos patrones inherentes al *modus operandi* de este trabajo de investigación, si bien, dada la diversidad de aspectos estudiados, cada bloque requiere un apartado de materiales y métodos específico.

Como común denominador metodológico, el presente trabajo parte de los patrones siguientes:

- El fin pretendido es básicamente procedimental.
- Queda planteado de manera secuencial, en etapas sucesivas, sin dejar de lado en ningún momento la dimensión medioambiental.
- Su finalidad es eminentemente práctica.
- Se prevé el empleo de las Mejoras Técnicas Disponibles (e.a. MTD) a medida que surjan.
- El horizonte temporal considerado como período de vigencia de las previsiones técnicas que se proponen es el año 2015, límite marcado por la Directiva 2000/60/CE que constituye un escenario propicio para el desarrollo de este tipo de actuaciones, quedando supeditada su procedencia posterior a la evolución de las pautas generales de la gestión hídrica europea tras el citado año.
- El tratamiento de la información por capas conlleva la integración de todos los datos espaciales georeferenciados en un Sistema de Información Geográfica (GIS). De este modo, es posible el tratamiento de la información de manera distribuida. En este contexto se ha llevado a cabo la digitalización de cuantas coberturas temáticas vectoriales se han considerado precisas para su tratamiento GIS.

El orden de presentación de los resultados ha sido anticipado en el apartado VI, “*Hilo Argumental*” por razones operativas, a pesar de que tal cometido puede ser considerado metodológico.

Las herramientas empleadas para la consecución de los objetivos previstos varían en cada bloque.

El estudio de los antecedentes se ha realizado consultando físicamente la totalidad de las fuentes citadas en la bibliografía (apartado 4 del presente bloque).

El estudio del marco legal de referencia se ha realizado, en su mayor parte, consultando las disposiciones legales en internet.

La profundización en el conocimiento del medio físico, funcionamiento del acuífero y respuesta ante las operaciones de AR se ha realizado, en gran parte, mediante operaciones de álgebra de mapas y cruces de coberturas temáticas para el tratamiento georeferenciado de la información.

Algunas de las coberturas utilizadas, ya existentes, o de digitalización propia, empleadas en casi todos los bloques, son las siguientes:

- Cobertura oficial de subcuencas hidrográficas, cauces fluviales y embalses elaborada por el CEDEX.
- Base Cartográfico Numérica BCN 2000 para elementos geográficos (núcleos de población, términos municipales y vías de comunicación) del Instituto Geográfico Nacional en formato shp para Arc/view.
- Cobertura de facies geológicas de la Comunidad autónoma de Castilla y León, generada por SIEMCALSA en formato GIS A/V.
- Borrador de la cobertura de humedales generada por el ICONA que actualmente revisa la DGCONA (digitalización propia mediante puntos en los humedales conocidos en la Comunidad Autónoma de Castilla y León).
- Cobertura de estaciones meteorológicas del INM.
- Cobertura de humedales de la Península Ibérica del ICONA, 1989.
- Cobertura de sitios RAMSAR, LICs y ZEPAS del Ministerio de Medio Ambiente, obtenida del CD *“Espacios Naturales Protegidos de Castilla y León.”*
- Cobertura de calidad de las aguas subterráneas por unidades hidrogeológicas elaborada por el MIMAM, así como las de puntos de control de las aguas subterráneas.
- Cobertura de humedales de elaboración propia a partir del listado de “zonas húmedas peninsulares conectadas con unidades hidrogeológicas” que aparece como apéndice 4 en el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas, (MOPTMA-MINER, 1994).
- Cobertura de formaciones permeables del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, no editada y actualmente en proceso de revisión.

Se ha realizado además una serie de coberturas temáticas actualizadas de información medioambiental, empleando para ello tableta digitalizadora y las aplicaciones informáticas *Arc/view 3.2* y *Didger 2.0*. Cabe destacar:

- Cobertura de bodones o lavajos en la zona de estudio, digitalizada por polígonos sobre la ortoimagen digital del año 2000 (la cobertura previa fue elaborada en 1989 e identifica los humedales con puntos, por tanto ha quedado obsoleta).
- Cobertura georeferenciada de actuaciones antrópicas previstas (tren de alta velocidad Madrid-Valladolid), cuyo trazado afecta al menos a tres de los humedales catalogados.
- Cobertura de zonas regables tras la concentración parcelaria que actualmente se lleva a cabo en la *Cubeta*.

- Coberturas de isocontenidos en determinados iones químicos en las aguas subterráneas, elaborada a partir de los resultados de los análisis químicos disponibles de puntos de agua localizados en la zona de estudio.
- Digitalización de la subdivisión de la zona de estudio en unidades homogéneas [designadas para el caso unidades hidroambientales (*UHAs*)].
- Todas aquellas coberturas temáticas para analizar, a nivel de estudio previo, aspectos hídricos, medioambientales (especificados en el Art. 8 del RD 1131/88), hidrogeológicos, tecnológicos y socioeconómicos.
- Coberturas propias de posicionamiento de todas las actuaciones: perforaciones, posición de toma de las muestras, redes de control, tipos de humedales, etc. de acuerdo con los criterios establecidos en Laín, (1999).

La mayor parte de estas coberturas ha sido incluida en la versión digital de la presente tesis.

Como complemento al apartado de materiales y métodos, se ha considerado procedente incluir una actualización, análisis y corrección de los datos precisos y su fuente.

VIII. FUENTES DE DATOS

Gran parte de los datos necesarios para el desarrollo de los objetivos previstos han sido actualizados. A continuación se citan las fuentes de referencia de los más relevantes, y, en ocasiones, el método de actualización empleado:

- Actualización de algunas de las coberturas mencionadas en el apartado previo.
- Medidas del nivel freático en redes de control. Éstas representan una ampliación de las diseñadas por el MAPA al abarcar una zona de estudio mayor. Las mediciones de piezometría han permitido la actualización de la cartografía hidrogeológica para la situación actual, tras un ciclo de recarga artificial.
- Datos disponibles en el IGME. Para ello se ha realizado una consulta a la base de datos de puntos de agua (Red Oficial de control de las Aguas Subterráneas, *ROCAS*), con objeto de acceder a información previa y actual. La consulta ha sido realizada en abril de 2003 para la totalidad de los datos disponibles en la zona de estudio. El resultado es el siguiente: existe información puntual de 15 puntos de agua, con un único dato de piezometría en 13 de ellos y ningún análisis químico hasta la fecha. Estos puntos han sido confirmados en campo e incorporados al inventario de puntos de agua.
- Datos disponibles de análisis químicos. Actualmente se dispone de los datos de 28 análisis químicos realizados por el MAPA en 1999 y 2003 en la red de control de la hidroquímica (*RCH*) de la Cubeta de Santiuste. Además se ha recopilado información en diversas bases de datos (*CHD*), y determinado parámetros inestables *in situ*.
- Actualización de datos meteorológicos (para ello se ha consultado la web www.mapya.es), obteniendo datos de estaciones agroclimáticas posteriores a 1999 y comprado los datos meteorológicos del *INM* de la estación 2502 del área de estudio.
- Actualización de los datos de consumos y demandas de agua para abastecimiento mediante encuestas enviadas a los Exmos. Aytos. de las localidades de la zona.
- Datos de consumos para regadío. Ya que actualmente se está realizando la concentración parcelaria, no se ha dispuesto de estos datos, si bien se ha calculado un volumen aproximado mediante procedimientos indirectos en el apartado de “balance hídrico”, a partir de las necesidades hídricas de los cultivos sobre el elenco actual y datos de encuestas.
- Medición de los parámetros específicos relacionados con la efectividad de la recarga artificial tras el primer ciclo. Estos índices son descritos en el apartado 3.3.1 del presente bloque (colmatación física).
- Por último destacamos la obtención de datos concretos mediante encuestas y conversaciones con habitantes de Santiuste, Coca y Villeguillo, especialmente ancianos, agricultores y cazadores.

BLOQUE

1



CONTEXTUALIZACIÓN

LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS. CIENCIA Y LEGALIDAD.

ASPECTOS TÉCNICOS, LEGALES Y ANTECEDENTES

“Es imposible que alguien aprenda lo que cree que ya sabe.”

Plutarco.





ÍNDICE DEL BLOQUE 1

MEMORIA

	Págs.
ÍNDICE	5
MEMORIA.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	7
ÍNDICE DE ANEXOS	9
LISTADO DE ACRÓNIMOS EMPLEADOS.....	13
I. AGRADECIMIENTOS	17
II. PRÓLOGO	19
III. INTRODUCCIÓN general	23
IV. Justificación.....	25
V. Objetivos	26
VI. HILO ARGUMENTAL.....	29
VII. MATERIALES Y MÉTODOS comunes.....	33
VIII.fuentes de datos	36
ÍNDICE DEL BLOQUE 1	39
BLOQUE 1. ÍNDICE DE FIGURAS.....	40
BLOQUE 1. ÍNDICE DE TABLAS	42
1. INTRODUCCIÓN.....	43
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
3. LA RECARGA NATURAL (NR) Y RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (AR o MAR). ESTADO DE LA CUESTION.....	44
3.1. RECARGA NATURAL Y ARTIFICIAL. BASE TEÓRICA	44
3.1.1. Recarga natural	44
3.1.1.1. Técnicas directas	44
3.1.1.2. Técnicas indirectas	45
3.1.2. Recarga artificial (AR)	49
3.1.2.1. Objetivos y ventajas de la AR	50
3.1.2.2. Condiciones precisas para la recarga artificial	51
3.1.2.3. Condiciones ambientales	52
3.1.2.4. Tipologías de Recarga artificial (AR).....	53
3.1.2.5. Mecanismo hidrodinámico de la recarga artificial	55
3.1.2.6. Sistemas de AR	60
3.1.2.7. Antecedentes históricos de sistemas de AR en España	60
3.1.2.8. Fases de un estudio de recarga de acuíferos	81
3.1.3. Recarga artificial y humedales.....	82
3.2. ALGUNAS EXPERIENCIAS DE AR EN EL MUNDO	86
3.2.1. Actuaciones en España	86
3.2.2. Algunas experiencias en Europa.....	90
3.2.3. Algunas experiencias en América.....	93
3.2.4. Algunas experiencias en África y Oriente Medio.....	93
3.2.5. Algunas experiencias en Asia.....	95
3.2.6. Algunas experiencias en Oceanía	95
3.3. LA COLMATACIÓN	96
3.3.1. Problemas de colmatación	96
3.3.1.1. Colmatación física	97
3.3.1.2. Colmatación biológica (bioclogging).....	101
3.3.1.3. Colmatación química.....	102
3.3.1.4. Generación de gases.....	103
3.3.1.5. Compactación	104



3.3.1.6.	<i>Sinergias entre los mecanismos de colmatación</i>	105
4.	RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	106
4.1.	MARCO LEGAL	106
4.1.1.	Aguas	107
4.1.2.	Medio Ambiente	108
4.1.3.	Legislación autonómica de Castilla-León	109
4.2.	ESTUDIO DE LOS ASPECTOS INSUFICIENTEMENTE CONOCIDOS DE LA CUBETA DE SANTIUSTE	113
4.3.	RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DOCUMENTAL	114
4.3.1.	Análisis del grado de conocimiento por sectores	130
5.	PRESENTACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	132
5.1.	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	133
5.1.1.	Estratigrafía	134
5.1.1.1.	<i>Terciario</i>	134
5.1.1.2.	<i>Cuaternario</i>	135
5.1.2.	Tectónica e historia geológica postmiocena	138
5.2.	CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL. EL ACUÍFERO DE LOS ARENALES	139
5.2.1.	Acuífero o Unidad superficial	143
5.2.2.	Acuífero o Unidad intermedia	143
5.2.3.	Acuífero profundo o Unidad inferior	144
5.3.	ENCUADRE LOCAL. LA CUBETA DE SANTIUSTE	146
5.3.1.	Condiciones de referencia. El entorno preoperacional de la zona de estudio	146
5.4.	LA COMUNIDAD DE VILLA Y TIERRA DE COCA	156
5.4.1.	Las poblaciones	156
6.	RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL BLOQUE 1	158

BLOQUE 1. ÍNDICE DE FIGURAS⁷

	Págs.
Fig. 1.01. En este esquema operativo, las operaciones de recarga artificial o AR se interpretan como un conjunto de bloques que unos se soportan a otros, quedando el objetivo final siempre inacabado. El conocimiento general y específico del medio soporta los aspectos cuantitativos y cualitativos de la recarga artificial, dotando a la actividad de gran utilidad práctica que es dirigida a aspectos medioambientales, ingeniería ambiental, diseño de dispositivos, etc. El proceso concluye con la divulgación y planificación de campañas de educación ambiental, dejando una línea abierta para futuras investigaciones.	21
Figs. 1.02.a) y b). La recarga artificial de acuíferos empieza a pasar de ser una “técnica especial” a una alternativa sólida, razonable y de gran futuro en la gestión hídrica del país. Este tránsito, aunque lento, empieza a ver sus dispositivos y actuaciones funcionando en el país. Dispositivo de Santiuste de san Juan Bautista y caz experimental de Villeguillo (Segovia).	22
Fig. 1.03. Hilo conductor. El tratamiento del tema de la recarga artificial de acuíferos pasa por varios apartados tales como la presentación del “estado del arte”, el marco legal que regula la actividad, el conocimiento del acuífero empleado como “laboratorio experimental”, el conocimiento cuantitativo y cualitativo del medio antes, durante y después de la recarga, el empleo de la técnica para objetivos medioambientales y el desarrollo de tecnologías aplicadas para mejorar la efectividad de los sistemas, fomentando además su divulgación y dejando la puerta abierta para el desarrollo de futuras líneas de investigación.	29
Fig. 1.04. Esquema del “hilo argumental”, guía empleada para presentar los estudios realizados en el presente trabajo de investigación.	32
Fig. 1.05. El Plano de Flujo Cero, ZFP o Zero Flux Plane representa una superficie hipotética dentro del acuífero que divide al suelo en dos sectores: El superior presenta un ascenso del agua gravifica por capilaridad y el inferior un descenso por gravedad.	50
Fig. 1.06. Transición de la dependencia del agua almacenada en el acuífero a la fuente de origen de la recarga inducida. Modificado de Balleau, 1988.	55
Fig. 1.07. Formación y avance del bulbo de infiltración.	57
Fig. 1.08 a) y b). Abombamiento de la superficie piezométrica.	59
Fig. 1.09. Control vertical. La cresta ha intercomunicado el fondo de la balsa de infiltración con el nivel freático a través del bulbo de humidificación, que funciona como un nuevo nivel freático. Fuente: ITGE (1991).	59

⁷ Aquellas fotografías de mayor expresividad que aparecen intercaladas en el texto han sido consideradas “figuras”, pero no aquellas seleccionadas para el Apéndice 1.2. (*Reportaje fotográfico*).



Fig. 1.10. Control lateral. La cresta ha alcanzado el cauce fluvial. El acuífero funciona temporalmente en régimen permanente, es decir, no hay variación en el almacenamiento o esta es muy ligera. Fuente: ITGE (1991)	60
Fig. 1.11. Dibujos que describen la estructura constructiva de las acequias de careo en las Alpujarras (Granada). Algunas de estas acequias, que fueron construidas por los musulmanes hace más de 600 años para favorecer la infiltración del agua del deshielo de Sierra Nevada en los acuíferos de la vega, están perfectamente preservadas y sujetas a un régimen de organización y gestión específico (dibujos de Cano-Manuel y González Ayestarán, 2000, facilitados por cortesía del Grupo Tragsa de Granada).	61
Fig. 1.12. Sondeos en las inmediaciones de la laguna de Aguasal. La perforación fue realizada en la franja perilagunar. Complejo de humedales de Coca-Olmedo. En otros casos se detectan perforaciones en el cuenco desecado.	61
Fig. 1.13. Esquema del funcionamiento de una fosa. Fuente: ITGE (1991)	65
Fig. 1.14. Ejemplo del dispositivo de recarga del cauce del río Gorgos, Jávea (Alicante) (modificado de Armayor et al, 2001).	67
Fig. 1.15. Efecto barrera del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste.	67
Fig. 1.16. Aspecto del camino de servicio del caso de recarga artificial superficial del dispositivo de la Cubeta de Santiuste (Segovia).	68
Fig. 1.17. Ejemplo de impactos inherentes a la construcción de la estructura de recarga. Removilización del terreno, tránsito de maquinaria, introducción de elementos extraños, polvo, ruido, afección a la vegetación, etc.	68
Fig. 1.18. Esquema sintético de recarga de la zona vadosa mediante pozos de recarga con un macizo filtrante, tubería de llegada del agua de recarga o bien de extracción y aislamiento de la superficie. La flecha azul simboliza la entrada de agua al dispositivo. Las flechas corresponden a líneas de flujo. La letra K al bulbo de humidificación.	70
Fig. 1.19. Ejemplo de una instalación ASR tipo. Bolívar, Adelaida, Australia. (Basado en CGS, 1996).	72
Figs. 1.20. Estructuras ASR. Emplazamiento de Bolívar, Adelaida, Australia del Sur.	72
Figs. 1.21) y 1.22). Estructuras ASR. Adelaida, Australia del Sur. Emplazamiento de Bolívar.	73
Figs. 1.23) y 1.24). Estructuras combinadas con la permanencia de humedales. Arriba: Véase el caudalímetro con vertedero en escalón intercalado y empleo de rejillas para proteger la calidad del agua y minimizar otros impactos. Abajo: Gran parte de estos dispositivos son aplicables a los sistemas de AR superficiales.	74
Figs. 1.25) y 1.26). Ejemplo de utilización conjunta de canales y sondeos. (Tomado de IGME, 2001).	75
Fig. 1.27. Pozo de drenes radiales típico de estructuras tipo RBF, (modificada de Hunt, 2003).	77
Figs. 1.28 a) a c). Concepto de túnel subterráneo en materiales blandos; en materiales duros cubiertos por otros blandos y en rocas duras respectivamente (Inspirado en Haas et al, 2003).	80
Fig. 1.29. Ejemplo de eficiencia en la recuperación en un dispositivo tipo ASR (modificado de Pyne, 1995).	81
Fig. 1.30. Esquemas de los aportes de agua y salida a un humedal/laguna y efecto sobre el balance salino, suponiendo aportes de agua dulce. SP es el agua superficial, SB la subterránea, E la entrada y S la salida (tomado de Custodio, 2001).	84
Fig. 1.31. Nueva clasificación de humedales de acuerdo con su relación hidrológica con los cursos de agua superficial y geomorfología (tomado de García Rodríguez, 2003).	84
Fig. 1.32. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en España. No han sido representados los experimentos escasamente divulgados, como las experiencias en la Cuenca del Guadiana.	89
Fig. 1.33. Recorte de prensa del periódico Levante de Castellón de fecha 23/03/2001. La recarga artificial de acuíferos presenta un grado de divulgación diferencial en el Estado español. Mientras en el oeste, aparentemente, es menos conocida, el grado de entendimiento es mayor en el arco mediterráneo.	89
Figs. 1.34 y 1.35. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en Inglaterra; y en Europa (excluidas España e Inglaterra) (Modificado de Grischek et al, 2002b).	92
Fig. 1.36. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en USA.	93
Fig. 1.37. Estructuras de MAR en Israel (tomado de Acreman, 2000).	94
Fig. 1.38. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en Israel.	94
Fig. 1.39. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en Australia.	95
Fig. 1.40. Clasificación de las partículas y filtros por su tamaño. Tomado de Pérez-Paricio, 2000a.	98
Fig. 1.41. Mecanismos durante la filtración del agua. En principio (izquierda) las partículas mayores que los poros quedan bloqueadas; durante la filtración son movilizadas y retenidas (en medio) y, en caso de movilización de las partículas, se distribuyen por el acuífero de acuerdo con su granulometría, haya o no compresión superficial (derecha). Tomado de Pérez-Paricio, 2000a.	98
Fig. 1.42. Factores que afectan el crecimiento de microorganismos y taponamiento del pozo de recarga (modificado de Van Beek, 1986).	103
Fig. 1.43. Perfil de una zanja de infiltración con un nivel colmatado, flujo a través de la ZNS hacia el acuífero y franja capilar por encima del nivel estático (modificado de Bouwer, 2002).	104
Fig. 1.44. Cambios en la capacidad de infiltración del acuífero durante la recarga en función de la concentración de sólidos disueltos. (Modificado de Bichara, 1986).	105



Fig. 1.45. Principales aspectos con influencia en la ecología de los humedales (modificado de Rey Benayas, 1982).....	118
Fig. 1.46. Situación geográfica de las comarcas a escala 1:200.000 y posición en la Península Ibérica.....	133
Fig. 1.47. Mapa de isobatas de la Cuenca del Duero. 1: Neógeno y Cuaternario; 2: Paleógeno; 3: Mesozoico; 4: Rocas plutónicas y metamórficas; 5: Paleozoico y Precámbrico; 6: Principales áreas investigadas; 7: Isobatas en metros (Alonso Gavilán et al, 1981; la depresión del Duero). Tomado de ITGE, 1989b.....	134
Fig. 1.48. Afloramiento de la Unidad Arévalo y de las subfacies arcillosas de Coca en la margen izquierda del río Voltoya.....	136
Fig. 1.49. Esquema paleogeográfico evolutivo del Neógeno de la Cuenca del Duero.(Portero et al, 1979, IGME, 1982c, Alonso, 1996).	139
Fig. 1.50. Esquema estratigráfico del Neógeno en la transversal norte-sur de la Cuenca del Duero, (Portero García et al, 1979-1983).	140
Fig. 1.51. Secuencia sedimentaria típica de sistema dunar (estratificación cruzada de bajo ángulo) en el talud del río Eresma dentro del TM de Villeguillo y en el arenero del Puente Chico de Coca.	141
Fig. 1.52. División del Terciario detrítico en Regiones hidrogeológicas, (tomado de IGME, 1993).	141
Fig. 1.53. Trazado de la poligonal de la Unidad Hidrogeológica Los Arenales (UU.HH. 02-17). El rectángulo corresponde a la zona de estudio, (modificado de ITGE, 1996). Figura sin escala.	142
Fig. 1.54. Esquema del funcionamiento del acuífero de Los Arenales (IGME, 1989, tomado de ITGE, 1993a).	142
Fig. 1.55. Sistemas de flujo del agua subterránea en el área de estudio. A: sistema regional. B: Sistemas locales. C: Todos los sistemas de flujo (tomado de Rey Banayas, 1990).	145
Fig. 1.56. Situación geográfica de la zona sobre la cartografía provincial de Segovia del Ministerio de Fomento. Escala aproximada 1:250.000.....	149
Fig. 1.57. Situación geográfica de la zona sobre la cartografía militar del SGE. Escala aproximada 1:150.000.	149
Fig. 1.58. Bloque diagrama elaborado con el modelo digital del terreno con paso de malla de 100 m y un factor de realce en la vertical de 10 para la apreciación, a grandes rasgos, de la fisiografía e hidrografía. Obsérvese que la zona está salpicada de abundantes bodones o lavajos, si bien la mayoría están desecados en la actualidad. ...	150
Fig. 1.59. Modelo digital del terreno superpuesto a una cobertura de pendientes con paso de malla de 100 m y un factor de realce en la vertical de 10 para la apreciación de las pendientes de la zona (en MAPA, 1999).	150
Fig. 1.60. Bloque diagrama de alambre o wireframe que refleja la fisiografía de la Cubeta.	151
Fig. 1.61. Bloque diagrama ráster que refleja la fisiografía de la zona de estudio elaborado a partir del MDT. La Cubeta queda comprendida entre los cauces fluviales y los afloramientos terciarios (colinas). Los principales pueblos, de sur a norte, son: Santiuste de San J&B, Coca y Villeguillo.....	152

BLOQUE 1. ÍNDICE DE TABLAS

	Págs.
Tabla 1.01. Determinación del Sy en diferentes tipos de materiales aplicando 17 técnicas diferentes (Johnson, 1967).....	47
Tabla 1.02. Determinación de la Sy en diferentes tipos de materiales a partir de estudios granulométricos de los sedimentos (traducido de Prickett, 1965).	47
Tabla 1.03. Determinación de la Sy aplicando la técnica del WTF y su interpretación por distintas metodologías, (traducido de Nwankwor, 1984).	48



BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La Cubeta de Santiuste representa “*un caso más*” de las zonas españolas que han sufrido una alteración importante en sus acuíferos, como consecuencia de la implantación y transformación en regadío durante las pasadas décadas, en el marco de la política desarrollista basada en la explotación agraria imperante en el Estado español en la segunda mitad del siglo XX.

Los efectos de esta actividad no han tardado en hacerse notar, apareciendo una serie de alteraciones medioambientales negativas acumulativas, e incluso sinérgicas, centradas en torno a la disminución del nivel freático en los acuíferos, la alteración cualitativa de las aguas de éstos, y la alteración directa de elementos singulares de gran valor ecológico. Entre éstos destacan una serie de lagunas, bodones o lavajos (según la terminología local) que han perdido su valor ecosistémico a consecuencia de su desecación, drenaje, rellenado y transformación en tierra de cultivo, o incluso sellado en aras del desarrollo.

Actualmente el MAPA está promoviendo estudios y trabajos tendentes a la recuperación del acuífero, especialmente en cuanto a cantidad se refiere. Estas actuaciones posibilitan la ejecución de estudios paralelos diferentes a los objetivos propuestos por el Estado español en esta área, pero basados en ciertos datos numéricos obtenidos para el mencionado propósito. En este grupo de estudios se enmarca el aquí presentado.

En este contexto, este primer bloque pretende constituir los cimientos para el desarrollo de un trabajo de investigación sobre recarga artificial de acuíferos, exponiendo el “estado de la cuestión” a nivel mundial, analizando los antecedentes legales y técnicos y presentando el “*laboratorio experimental*” empleado para extraer conocimientos y conclusiones que puedan tener validez en otros ámbitos.

En el “estado de la cuestión” se pretende “tomar el pulso” a la popularidad de la técnica de recarga de acuíferos en la sociedad española, presentando un esbozo sobre su aplicación en España y en otros escenarios del mundo. Para ello se presentan una serie de nociones técnicas relativas a la recarga artificial, *AR* o *MAR*, como primer paso dentro de un objetivo básico del proyecto: la divulgación.

El grado de información existente sobre la *Cubeta* es alto. Como “antecedentes” específicos cabe adelantar ciertos estudios realizados por el MAPA en la mayoría de los casos, que se comentan críticamente en este bloque. También se analizan los principales antecedentes, profundizando en el conocimiento de los aspectos menos conocidos. En la bibliografía se facilitan reseñas suficientes para ampliar la información aquí presentada.

Finalmente se describe el “laboratorio natural” del estudio, la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista, en Segovia, donde el MAPA ha construido y lleva el seguimiento de una de las instalaciones de AR de mayor tamaño de España, de acuerdo con la filosofía de la Política Agraria Común (e.a. PAC), el Plan Nacional de Regadíos (PNR) y las implicaciones medioambientales directas insertas en ambos.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Dado el carácter eminentemente divulgativo de este bloque, en este apartado tan solo cabe citar como materiales a la bibliografía específica, listada al final del trabajo; y como método, la recopilación bibliográfica y documental y su posterior lectura y análisis.

Las fuentes de origen han sido varias librerías y bibliotecas, así como internet.

En cuanto al tratamiento de los datos poblacionales, se ha contado con información verbal y de encuestas realizadas a la corporación municipal de los ayuntamientos de las localidades implicadas, así como datos obtenidos de la oficina de turismo de Coca.

3. LA RECARGA NATURAL (NR) Y RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (AR o MAR). ESTADO DE LA CUESTION

Con objeto de cumplir con uno de los objetivos básicos de este proyecto de investigación, la divulgación, en este apartado se presenta un fondo teórico relativo a la recarga artificial de acuíferos. Éste permitirá entender los conceptos, tecnicismos e índices que serán aplicados en apartados posteriores, además de presentar una visión del estado de la cuestión de la recarga artificial en distintos lugares donde se aplica.

Como etapa previa al conocimiento de la técnica de la recarga artificial (AR) se ha considerado procedente estudiar la recarga natural (NR) de acuíferos. Ambos objetivos son abordados a continuación.

3.1. RECARGA NATURAL Y ARTIFICIAL. BASE TEÓRICA

En este apartado son presentados algunos de los aspectos más importantes en recarga natural y artificial.

3.1.1. Recarga natural

En sentido amplio, “*recarga*” es la cantidad de agua infiltrada que alcanza un sistema de aguas subterráneas (*Custodio, 1993*), o bien, la entrada de agua a la zona saturada procedente de la superficie del terreno y asociada al flujo descendente de las aguas hacia la zona saturada (*Freeze and Cherry, 1979*).

Existen varios procedimientos para la evaluación de la recarga. Entre ellos se distinguen las técnicas directas e indirectas:

3.1.1.1. Técnicas directas

Cabe destacar las siguientes:

- Las mediciones directas mediante lisímetros e infiltrómetros.



- Métodos de balance de masas, bien determinados *in situ* (técnica directa) o bien simulados en gabinete con modelos estocásticos de la precipitación (indirecta).
- Cálculos darcinianos (con cierta incertidumbre sobre la retención en la zona no saturada).
- Técnicas de trazadores químicos e isotópicos naturales (*Edmunds & Tyler, 2002*).
- Balance de Masas de Trazadores (CMB), especialmente cloruros.
- Empleo de radionucleidos atmosféricos.
- Técnicas ambientales.

3.1.1.2. *Técnicas indirectas*

Destacamos las siguientes:

- Estimación de la recarga a partir de líneas de flujo a distintas escalas (*Maxey & Eakin, 1950*).
- Técnicas de modelación y simulaciones inversas de estimación de la recarga (*Sanford, 2002*).
- Técnicas de teledetección por microondas, empleadas con el fin de cartografiar el dominio espacial de la humedad superficial del suelo y controlar su dinámica temporal (*Jackson, 2002*).
- Métodos empíricos basados en estimaciones previas de la precipitación suficientemente distribuidas en el espacio (*Maxey & Eakin, 1950*), con frecuencia apoyados por técnicas GIS (*De Vries, 2002*).
- Modelación inversa de perfiles de sondeos a lo largo de una zona no saturada gruesa (*Flint et al, 2002*).
- Estudios de la fluctuación del nivel freático (*Sophocleous, 2002*).

La estimación de la recarga debe ser realizada aplicando distintas técnicas de las aquí presentadas, dado el alto grado de incertidumbre de los procesos que regulan la recarga (*Scanlon et al, 2002*), su variabilidad espacio-temporal y el grado de influencia de diversos factores. Al considerar la influencia de las aguas subterráneas, el estudio debe ser realizado además a tres escalas diferentes dentro de un sistema de flujo: escala regional, intermedia y local (*Tóth, 1963*).

Su estimación integrada en el cálculo de un balance hídrico específico cuenta con el inconveniente de su escasa magnitud, de modo que, en ocasiones, el error originado al evaluar los otros términos es mayor que la recarga en sí. El volumen evaluado corresponde en su mayoría a drenaje profundo (*Cook et al, 1989*).

El agua de recarga, de origen superficial, interacciona con las aguas subterráneas (interacción que es citada en varias fuentes bibliográficas con la abreviatura “*GW-SW*”) y con el acuífero mediante reacciones complejas controladas por numerosos factores, como son los

factores climáticos, geológicos, bióticos y orográficos (*Sophocleous, 2002*), a los que hay que añadir los geomorfológicos (*Flint et al, 2001*). En este sentido, se constituyen interesantes sistemas de interacción.

El avance en el conocimiento de estos sistemas requiere de análisis multidimensionales, caracterización de la hidráulica en la interfaz y de la variabilidad espacial, métodos de regionalización, y colaboraciones interdisciplinarias (*Sophocleous, 2002*). Estos conocimientos permiten su posterior modelación, etc.

En este contexto teórico, y como baremos orientativos, cabe citar que la recarga natural ronda el 30-50% de la precipitación en climas húmedos, 10-20% en clima mediterráneo y alrededor del 0-2% en climas secos (*Bouwer, 2002; Tyler et al, 1996*).

- **Aplicación del método WTF o Fluctuación del Nivel del Agua**

Se trata de un método de aplicación relativamente fácil tanto para estimar la recarga en situaciones tanto de régimen natural (NR), como artificial (AR).

La técnica de medición de la fluctuación del nivel del agua o **WTF** posibilita estimar el término *recarga* en un balance hídrico, entendiendo por éste la variación en el almacenamiento de agua en un acuífero, que es atribuida a la recarga de aguas superficiales que alcanzan la capa freática, y descontando las descargas de aguas subterráneas a ríos, manantiales o extracciones antrópicas (*Schict & Walton, 1961; Healy & Cook, 2002*).

Es un método específico para acuíferos libres, con mediciones suficientes de la piezometría y conocimiento preciso del coeficiente de almacenamiento específico.

La formulación del balance es:

$$R = S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + Q^{gw}_{saliente} - Q^{gw}_{entrante}$$

Donde:

- R es la recarga.
 - S^{gw} es la variación en el almacenamiento.
 - Q^{bf} es el flujo a nivel de base.
 - ET^{gw} es la evapotranspiración.
 - Q^{gw} son las descargas naturales y extracciones.
- (todos los términos expresados en unidades de volumen, por ejemplo en mm).

El cálculo del WTF corresponde a la expresión:

$$R = S_y \cdot dh / dt = S_y \Delta h / \Delta t$$

Donde:

- S_y es el coeficiente de almacenamiento específico (adimensional).
- Δh es el incremento del nivel del agua (longitud).
- t es el tiempo.



El cálculo de S_y , definido como la diferencia entre la porosidad y la retención específica (volumen de agua retenido por una roca o suelo por unidad de volumen de la roca o suelo), queda definido con independencia del tiempo, si bien, la liberación de este volumen de agua no es instantáneo, ni son tenidas en cuenta en la definición los efectos de la temperatura y el quimismo de las aguas. Como consecuencia, las estimaciones de S_y deben ser realizadas aplicando diferentes metodologías.

A este respecto, conviene citar un estudio realizado por *Johnson*, 1967, quien, a partir de la textura de diferentes tipos de materiales, determinó su S_y , aplicando 17 técnicas diferentes. El resultado se presenta en la Tabla 1.01:

Textura	Coficiente de Almacenamiento Específico Medio	Coficiente de Variación (%)	Coficiente de Almacenamiento Específico Mínimo	Coficiente de Almacenamiento Específico Máximo	Número de Determinaciones
Arcilla	0.02	59	0.0	0.05	15
Limo	0.08	60	0.03	0.19	16
Arena Arcillosa	0.07	44	0.03	0.12	12
Arena Fina	0.21	32	0.10	0.28	17
Arena Media	0.26	18	0.15	0.32	17
Arena Gruesa	0.27	18	0.20	0.35	17
Arenas y Gravas	0.25	21	0.20	0.35	15
Gravilla	0.25	18	0.21	0.35	17
Grava Media	0.23	14	0.13	0.26	14
Grava Gruesa	0.22	20	0.12	0.26	13

Tabla 1.01. Determinación del S_y en diferentes tipos de materiales aplicando 17 técnicas diferentes (*Johnson*, 1967).

Una técnica adicional para la obtención de parámetros hidráulicos es el estudio granulométrico de los sedimentos. A este respecto, se destacan los trabajos de *Pricket*, quien propone unos rangos medios de S_y , deducidos de estudios de la humedad del suelo y del potencial mátrico, que resume en la Tabla 1.02 (*en Pricket*, 1965):

Material	S_y	Material	S_y
Arena media a gruesa	0.200	Arena media a gruesa	0.250
Arena media	0.161	Arena fina	0.113
Arena media	0.166	Arena con limo a media	0.014
Arena media	0.181	Arena fina a media	0.192
Arena fina a media	0.032	Arena fina a gruesa	0.014
Arena media con limo	0.051	Arena media con arcilla	0.021
Arena fina a media	0.005	Arena media con arcilla	0.206
Arena fina a media	0.007	Arena fina con limo	0.018
Arena fina	0.09	Arcilla limo arena fina	0.039

Tabla 1.02. Determinación de la S_y en diferentes tipos de materiales a partir de estudios granulométricos de los sedimentos (traducido de *Pricket*, 1965).

Las determinaciones de campo se suelen realizar a partir de la interpretación de ensayos de bombeo. El método resulta agregado para todo el comportamiento del acuífero en la vertical, a diferencia de los métodos anteriores, basados en el análisis de sedimentos obtenidos a una profundidad determinada.

Una metodología de campo y gabinete apropiada se basa en el método del balance volumétrico, que incorpora el método WTF y métodos de campo, se basa en la observación de la

evolución del cono de depresión durante el bombeo, y realiza un balance hídrico para este espacio físico.

Estudios realizados por *Nwankwor, 1984* en gravas arenosas, muestran un aumento de la S_y con el tiempo de bombeo por drenaje diferido desde la zona no saturada, proponiendo unos valores teóricos para su zona de estudio, que se presentan en la Tabla 1.03:

Método	S_y	Duración ensayo (t)
Neuman (1972)	0,07	-
Boulton (1963)	0,08	-
Balance Volumen	0,02	15 min
	0,05	40 min
	0,12	600 min
	0,20	1.560 min
	0,23	2.690 min
	0,25	3.870 min
Laboratorio (\emptyset - θ_r)	0,30	-

Tabla 1.03. Determinación de la S_y aplicando la técnica del WTF y su interpretación por distintas metodologías, (traducido de *Nwankwor, 1984*).

A tenor de los resultados, se advierte que los resultados obtenidos en laboratorio suelen estar sobreestimados con respecto a los obtenidos en campo.

El método presenta una interesante vía de investigación, que es cuál de los métodos de interpretación de ensayos de bombeo de la literatura hidrogeológica permite una estimación de la S_y más certera.

El drenaje instantáneo desde la ZNS convierte al método de Neuman (*Neuman, 1972*) en el más apropiado, al asumir el drenaje desde la ZNS o desde un flujo radial externo al cono de depresión.

Un método adicional es el de *Moench (1994)*, quien propuso un tipo de curva para pozos con penetración parcial y bombeos simultáneos.

Ambos métodos de interpretación han dado buenos resultados en la interpretación de los ensayos de bombeo en nuestra *Cubeta experimental (MAPA, 1999a)*.

El drenaje diferido desde la zona no saturada ha desvelado la importancia de considerar un término adicional, tradicionalmente no tenido en cuenta en la interpretación de ensayos de bombeo. Se trata de la capacidad de campo, o cantidad de agua no gravífica retenida por los suelos una vez drenado el exceso de agua gravitacional (*Veihmeyer & Hendrickson, 1931*). Este factor subyace en el método WTF, ya que permite determinaciones hacia y desde la capa freática.

La capacidad de campo, o humedad retenida a una profundidad determinada, constituye además el mayor error al estimar la conductividad hidráulica. De ahí la importancia de la instrumentación de lisímetros en zonas piloto, y el uso de modelos de caja o de cubo. Una adecuada estimación será la media de un período interanual de al menos dos o tres años (*Walker et al, 2002*).

La técnica WTF aporta mejores resultados cuando es combinada con el balance hídrico en la ZNS (*Sophocleous, 1991*), y se tienen en cuenta los mecanismos de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas (*Fetter, 1994; Sophocleous, 2002*). Algunos de los inconvenientes detectados en el método son:

- Distribución desigual en el espacio y tiempo, especialmente en zonas semiáridas.
- Dificultad de estimar ciertos parámetros para un balance hídrico clásico (curva de retención del suelo, distribución y tipo de vegetación, etc.).
- Dificultad de extrapolar datos puntuales con fiabilidad.
- Relaciones con cauces, etc.
- Impactos derivados de operaciones de recarga artificial.
- Cantidad de aire que ha penetrado en el acuífero durante las operaciones de recarga artificial, que es computado como agua según este método.

La técnica del WTF ha sido la seleccionada para calcular el volumen de agua recargado durante el primer ciclo, tras un análisis detallado de posibilidades. El cálculo se presenta en el Bloque 2.

3.1.2. Recarga artificial (AR)

La recarga artificial se entiende como “el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua” (*Freeze and Cherry, 1979*).

En líneas generales, se puede decir que la recarga artificial consiste en la introducción de agua en el acuífero de manera no natural, para, entre otras cosas, incrementar la disponibilidad y/o mejorar la calidad de las aguas subterráneas (*Custodio y Llamas, 1983*).

Una visión más práctica de la técnica es la de Bouwer: “La recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero” (*en Bouwer, 2002*).

Otra definición de recarga artificial ha sido aportada por la UNESCO: “Aumento de la alimentación natural de agua subterránea a los acuíferos o embalses de agua subterránea suministrando agua a través de pozos, inundando o cambiando las condiciones naturales” (*en UNESCO, 2002*).

Existe un concepto teórico de importancia tanto para recarga natural como artificial. Se trata del **Plano de flujo cero o Zero Flux Plane (ZFP)**, que es la superficie que puede existir o no y que divide el suelo en dos sectores: El superior presenta un ascenso del agua gravífica por capilaridad, el inferior, un descenso. El estudio de su variación en la vertical mediante técnicas geofísicas permite el establecimiento de balances hídricos, empleando para ello sondas de neutrones en sondeos (*Meyer, 1962*). Este concepto aparece esquematizado en la Fig. 1.05.

Un nuevo concepto de suma importancia es aquel que permite diferenciar el porcentaje del agua de recarga (natural o artificial) retenida en el suelo que percola hacia el acuífero de aquel volumen de agua de recarga que alcanza el nivel freático. Esta distinción introduce el término de “*recarga potencial*” (Rushton, 1988), término conceptual importante para modelización y gestión hídrica. De este modo, la recarga potencial es mayor en zonas donde el nivel freático se encuentra cercano a la superficie del terreno.

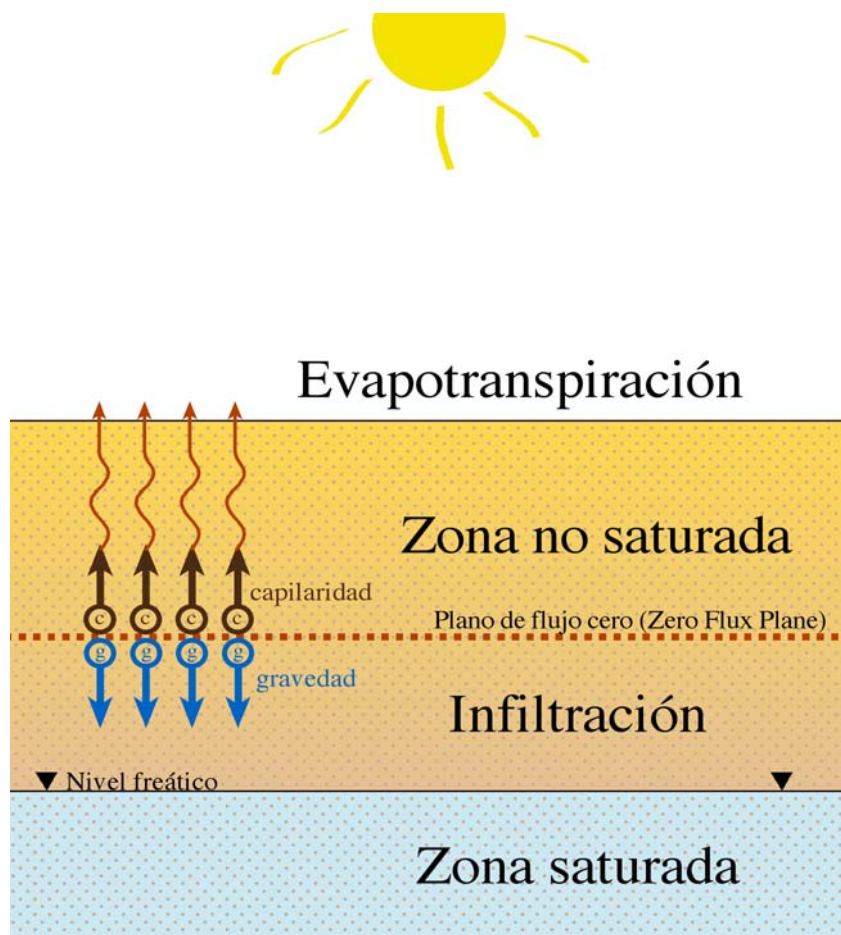


Fig. 1.05. El Plano de Flujo Cero, ZFP o Zero Flux Plane representa una superficie hipotética dentro del acuífero que divide al suelo en dos sectores: El superior presenta un ascenso del agua gravífica por capilaridad y el inferior un descenso por gravedad.

3.1.2.1. Objetivos y ventajas de la AR

La recarga artificial representa una alternativa cada vez más extendida frente a los sistemas de almacenamiento en superficie, tanto a corto como a largo plazo.

El **objetivo** principal de la recarga artificial es aumentar los recursos hídricos subterráneos disponibles, y mejorar la calidad de las aguas (ITGE, 1991; Bouwer, 2002). Otros objetivos son: reducir la intrusión marina o salina continental, evitar procesos de subsidencia en el terreno, almacenar agua en el subsuelo, mejorar la calidad mediante técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT) o geopurificación, el uso de acuíferos como sistemas de conducción de agua y proporcionar una fuente de abastecimiento subterráneo en aquellas zonas en las que, por tradición, se prefiere este recurso a las aguas superficiales. Otros usos de la recarga artificial en zonas volcánicas es la geotermia (Bouwer, 2002).

Las principales **ventajas** de la técnica son (*Martín-Alonso, 2003*):

- Incrementar las reservas en los acuíferos.
- Facilitar el transporte de agua a través del acuífero, reduciendo el uso de conducciones y tuberías.
- Mejorar y homogeneizar la calidad del agua.
- Reducir costes de bombeo, frenar la intrusión marina, y otros efectos consecuentes del ascenso del nivel freático en el acuífero.

Para ello es necesario realizar las siguientes actuaciones (*Lerner et al, 1990; Bouwer, 1999 y 2002*):

- Reducir e incluso eliminar el descenso del nivel del agua producido por sobrebombeo, que genera los consiguientes problemas de abandono de pozos que no penetran totalmente en el acuífero, y/o reprofundización de los mismos con el coste adicional que ello conlleva.
- Utilización del acuífero como embalse regulador y almacén. Esto posibilita, por un lado, disminuir las pérdidas de agua por evaporación, y por otro, facilitar a los usuarios la oportunidad de tener una cierta independencia de las intermitencias del ciclo hidrológico, y una favorable repartición temporal de los recursos, aumentando el rendimiento y la regulación de los recursos del agua.
- Utilización del acuífero como red de distribución, lo que permite evitar la construcción o instalación de conducciones de agua innecesarias y costosas.
- Compensación de la pérdida de recarga natural en un acuífero causada por actividades humanas, tales como encauzamientos, derivaciones de agua, construcción de obras civiles, etc.
- Evitar que las aguas de inferior calidad existentes en el acuífero se desplacen hacia las captaciones de buena calidad. Una técnica para evitar que el flujo contaminante llegue a la zona de explotación consiste en ubicar las zanjas o fosas de infiltración en posición intermedia entre las captaciones para abastecimiento y las zonas susceptibles de producir contaminación.
- Evacuación y depuración de aguas residuales urbanas, que, tras un tratamiento anterior a su infiltración en el terreno, este modifica su calidad de acuerdo con su capacidad de autodepuración.

3.1.2.2. Condiciones precisas para la recarga artificial

La realización de esta técnica precisa de ciertos requisitos *sine qua non*:

- Suelos permeables. Sus características condicionan el método de recarga más idóneo, que puede ser la excavación de zanjas o minas en la zona no saturada, o bien la perforación de



pozos para inyectar el agua directamente en el acuífero. El diseño del sistema requiere determinar la tasa de infiltración del suelo, con objeto de comprobar que la permeabilidad de la zona no saturada (ZNS) es apropiada y que no hay focos de contaminación importantes (*Bouwer, 2002*).

- Acuífero suficientemente transmisivo. Los acuíferos receptores deben ser libres y suficientemente transmisivos para impedir la generación de domos en la superficie piezométrica. La permanencia de estos domos durante períodos largos pueden interferir en los procesos de infiltración, además de producir inundaciones (*Bouwer, 2002*). En acuíferos de alta transmisividad el impacto motivado por un ascenso excesivo del nivel piezométrico queda minimizado. Este parámetro debe ser determinado mediante investigaciones de campo y ensayos de infiltración.
- Calidad de las aguas adecuada. Además de evitar el arrastre de contaminantes preexistentes, el agua de recarga debe presentar unas propiedades que evite la formación de capas colmatantes en las superficies de infiltración, el deterioro de las estructuras y elementos de obra, etc.

La **colmatación** puede ser considerada un impacto medioambiental negativo que afecta a las estructuras de *AR*. Su tratamiento debe ser realizado mediante procedimientos preventivos (filtrado y/o pretratamientos del agua), y curativos, mediante la restauración de la capacidad de infiltración del sistema con técnicas como el secado, secado-rehumedecimiento, retirada de la capa colmatada, filtrado, lijado, escarificación, técnicas de roturación, etc. Los pozos de recarga deben ser bombeados periódicamente para desprender los materiales colmatantes durante el flujo inverso (*Bouwer, 2002*).

Es tal la importancia de este proceso que el apartado 3.3. aborda con cierto detalle el fenómeno.

El principal condicionante a la hora de acometer cualquier tipo de recarga artificial es la **fuentes de suministro de agua**. Las aguas suelen ser de origen superficial (curso fluvial o escorrentía de las aguas de tormenta), aguas residuales domésticas, bien con un pretratamiento previo a su infiltración en el terreno o no, y, por último, aguas procedentes de otro acuífero (*OMS, 1989*).

3.1.2.3. Condiciones ambientales

La recarga artificial se justifica principalmente en los acuíferos donde la demanda de agua supera a los recursos renovables del mismo, con la consiguiente disminución de sus reservas totales. Esta justificación da cabida al término “*safe yield*” (*Pérez-Paricio, 2000a y b*), aplicado cuando la tasa de explotación nunca sobrepasa el volumen recargado.

En general, los procesos de recarga y su efectividad estarán determinados por la interacción del clima, geología, morfología, tipo de suelo y vegetación.

Las condiciones más favorables para la recarga artificial son: escasa cubierta vegetal en suelos permeables o fisurados, con el nivel del agua cercano a la superficie y pluviometría acusada (*De Vries & Simmers, 2002*).

Las actuaciones de recarga en formaciones aluviales actuales conlleva el problema de la alta evapotranspiración de la vegetación hidrófila y riparia.

Tradicionalmente se ha considerado que el agua que atraviesa la zona radicular escapa de los procesos evapotranspirativos, si bien existen varios mecanismos que permiten el ascenso desde profundidades considerables.

Este hecho puede representar un volumen nada desdeñable en climas áridos. Algunas experiencias han demostrado la existencia de flujos ascendentes, por capilaridad, desde acuíferos colgados a profundidades de 15 y 20 m, con tasas de ascenso de hasta 1 mm/año (*Coudrain-Ribstein et al, 1998*).

El mismo proceso ha sido detectado en zonas áridas y semiáridas por algunas plantas de gran profundidad radicular. Cabe citar ejemplos de sistemas dunares de regiones áridas, donde algunas especies de tamarindos han provocado el ascenso de agua desde 15 metros de profundidad (*De Vries & Simmers, 2002*); o acacias en zonas desérticas que motivan el ascenso físico de aguas desde los 50 m (*De Vries & Simmers, 2002*). En algunas regiones de España se han cuantificado procesos extractivos llevados a cabo por la especie *Retama sphaerocarpa* desde profundidades de 16 y 28 m (*Haese et al, 1996*).

La infiltración de las aguas de recarga tiene un control estacional. Según estudios realizados con infiltrómetros, la conductividad hidráulica, generalmente, es menor en invierno que en verano, dado que el agua más caliente tiene una viscosidad menor y una capacidad de secado e infiltración mayor (*Bouwer, 2002*). Por otro lado, los procesos generadores de colmatación biológica son más activos en la época estival, mientras que la congelación de los suelos reduce drásticamente la capacidad de infiltración.

El transporte de agua en forma de vapor es otro mecanismo que provoca un flujo ascendente en invierno y descendente en verano con un gradiente térmico de 4°, según experiencias realizadas en Botswana (*De Vries et al, 2002*).

3.1.2.4. Tipologías de Recarga artificial (AR)

Los diferentes mecanismos empleados para llevar a cabo actuaciones de recarga y las tipologías de recarga artificial resultantes han sido conceptualmente definidos por *Lerner* (*en Lerner et al, 1990*), como:

- **Recarga directa**

Aportación en exceso de agua al acuífero sobrepasando el déficit de humedad del suelo y de evapotranspiración, consiguiendo una percolación vertical directa hacia la zona vadosa. Se trata de la forma de recarga menos efectiva en términos del nivel de llenado del acuífero (*De Vries & Simmers, 2002*).

- **Recarga indirecta**

Se emplea para definir la recarga que se produce por percolación hasta la superficie piezométrica a través de niveles horizontales o cursos de agua.

- **Recarga localizada**

Una forma intermedia de recarga desde la superficie en ausencia de canales, cursos de agua o formaciones bien definidas.

Otras formas de recarga son (además de la natural), la realizada o incrementada, inducida y accidental. (*Bouwer, 2002*).

- **Recarga realizada o incrementada (*Enhanced Recharge o ER*)**

Se trata de una técnica de recarga superficial que va acompañada del reemplazo de vegetación de gran profundidad radicular por otras especies de raíces más someras o suelo baldío, con objeto de que la cantidad de agua que alcanza el suelo sea mayor, al existir menor intercepción por la vegetación. En algunos lugares se están reemplazando árboles perennes, en general, coníferas (*Querner, 2000*).

- **Recarga inducida**

Se basa en perforar y explotar pozos en zonas cercanas a drenes naturales (ríos, arroyos, y por ende, humedales), de modo que el agua superficial es inducida a penetrar en el acuífero mediante el bombeo de pozos (*Bouwer, 2002*). En estos bancos de filtración se consigue un pretratamiento del agua del río previamente a su empleo, generalmente para abastecimiento.

Esta técnica es empleada en los sistemas de Filtración en el lecho de los ríos o *River Bank Filtration* (RBF), que serán definidos más adelante.

La recarga inducida puede funcionar en régimen permanente, cuando el volumen de agua de descarga o bombeo es compensado con agua de recarga. Esta situación teórica introduce un nuevo tecnicismo, que es el “*Groundwater depletion*” (GD) es un término técnico que representa el descenso del nivel dinámico del pozo cuando las condiciones entre la fuente de recarga y descarga han entrado en “control lateral” (este concepto es explicado en el apartado siguiente). En la mayoría de las circunstancias son precisos largos períodos de tiempo para el desarrollo de las condiciones de equilibrio (*Balleau, 1988*).

La presencia de procesos contaminantes en la zona de captura de las aguas de un río o lago puede trasladar los problemas cualitativos al lago, o, por extensión, al humedal (*Turner, 1998*).

La transición del almacenamiento de aguas subterráneas en el acuífero y el establecimiento de una recarga inducida en el sistema por conexión con una fuente de agua

superficial, conlleva una disminución del volumen del agua almacenada en el acuífero en función de varios parámetros. Entre estos cabe anteponer la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento, la distancia de la fuente de recarga al punto de descarga y la variable tiempo, según representa la Fig. 1.06.

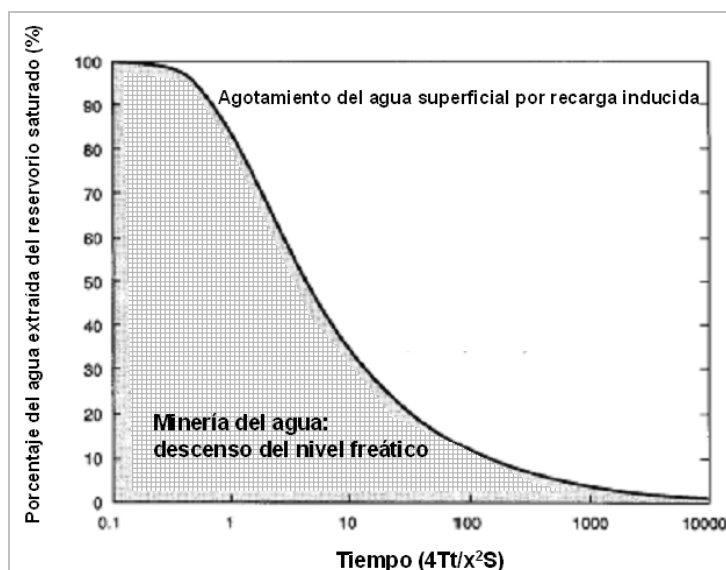


Fig. 1.06. Transición de la dependencia del agua almacenada en el acuífero a la fuente de origen de la recarga inducida. Modificado de Balleau, 1988.

Leyenda:

- T: Transmisividad ($\text{m}^2/\text{día}$)
- S: Coeficiente de almacenamiento
- X: Distancia de la fuente de recarga al punto de descarga (m)
- T: tiempo (días)

• La recarga accidental

Es aquella que produce aportaciones al acuífero de manera no intencional: fugas de conducciones o fosas sépticas, retornos de regadío, agua de lavado de zonas regables para impedir la concentración de sales en la zona radicular, etc. En la mayoría de los casos, la recarga accidental representa un impacto negativo para los acuíferos (Bouwer, 1999).

3.1.2.5. Mecanismo hidrodinámico de la recarga artificial

Los procesos de aportación de agua al acuífero pueden ser (Lerner, 1997):

- Por percolación difusa desde la zona no saturada o en la misma zona saturada (flujo de tipo pistoneo).
- Flujo a través de canales, grietas de retracción o fisuras.
- Flujo preferencial causado por frentes de humidificación inestables que progadan dependiendo de las características físicas del suelo, especialmente contrastes de permeabilidad (FAO, 1998).

El mecanismo hidrodinámico de la recarga artificial comprende, en líneas generales, las siguientes fases consecutivas:

- **Fase 1. Formación y avance del bulbo de infiltración**

Es la fase comprendida entre el momento en que el agua llega a la balsa y el instante en el que comienza la cesión al acuífero por infiltración (Fig. 1.07.).

En la “zona no saturada” (ZNS) el flujo del agua es esencialmente vertical, de forma que el agua que recibe la formación percola poco a poco en el terreno, ocupando cada vez un mayor porcentaje de huecos y humidificando el mismo. De este modo se genera un bulbo de humidificación descendente.

El caudal de entrada debe ser suficiente para la humidificación progresiva del terreno de la “zona no saturada” y permitir que el *frente húmedo del bulbo* llegue hasta la “zona saturada.”

La velocidad de infiltración numéricamente es similar a la conductividad hidráulica vertical de la ZNS, ya que el desplazamiento es principalmente por gravedad y el gradiente hidráulico es unitario.

La franja capilar normalmente tiene unos 30 cm de espesor para arenas de grano medio, algo superior si son finas (Bouwer, 1982).

El espesor de la lámina de agua influye en la velocidad de infiltración.

En sistemas superficiales tipo zanjas, el espesor de la lámina de agua no incrementa la capacidad de infiltración, siendo recomendable láminas de espesor cercanas a 0,5 m (Bouwer, 2002).

En pozos de infiltración, experiencias desarrolladas en Australia han sugerido que cuando el bulbo de humidificación ha alcanzado la profundidad de un metro bajo el fondo de la zanja o fosa de infiltración, o el nivel colmatante, el rango de infiltración no resulta afectado por variaciones del nivel del agua (Dillon and Ligget, 1983).

- **Fase 2. Abombamiento de la superficie piezométrica**

En el momento en que el frente húmedo se pone en contacto con el límite superior de la “zona saturada”, el nivel piezométrico comienza a experimentar un abombamiento ascendente. El bulbo de humidificación ha entrado en control vertical. La totalidad del agua introducida se almacena formando una cresta de agua que va en aumento. Cuando se produce este contacto, desciende la velocidad de infiltración (Dillon & Ligget, 1983).

El crecimiento tridimensional continúa, hasta alcanzar un límite de control que impide la expansión.

En la fig. 1.08. se representa un sistema de recarga en control vertical. Puede observarse cómo la cresta aumenta hasta alcanzar la base de la balsa/pozo de recarga. En esta fase cesa el crecimiento en la vertical, no así el crecimiento en extensión lateral.

La velocidad de expansión está controlada por el gradiente hidráulico o pendiente del bulbo de humidificación. Según experiencias realizadas en USA, la expansión lateral presenta un gradiente mayor que el del nivel del agua en una distancia de, al menos, **10 veces** la anchura de la franja de recarga, en aquellos casos en los que el nivel del agua se encuentra a una profundidad cercana al doble de la anchura del caz (*Bouwer, 1999*).

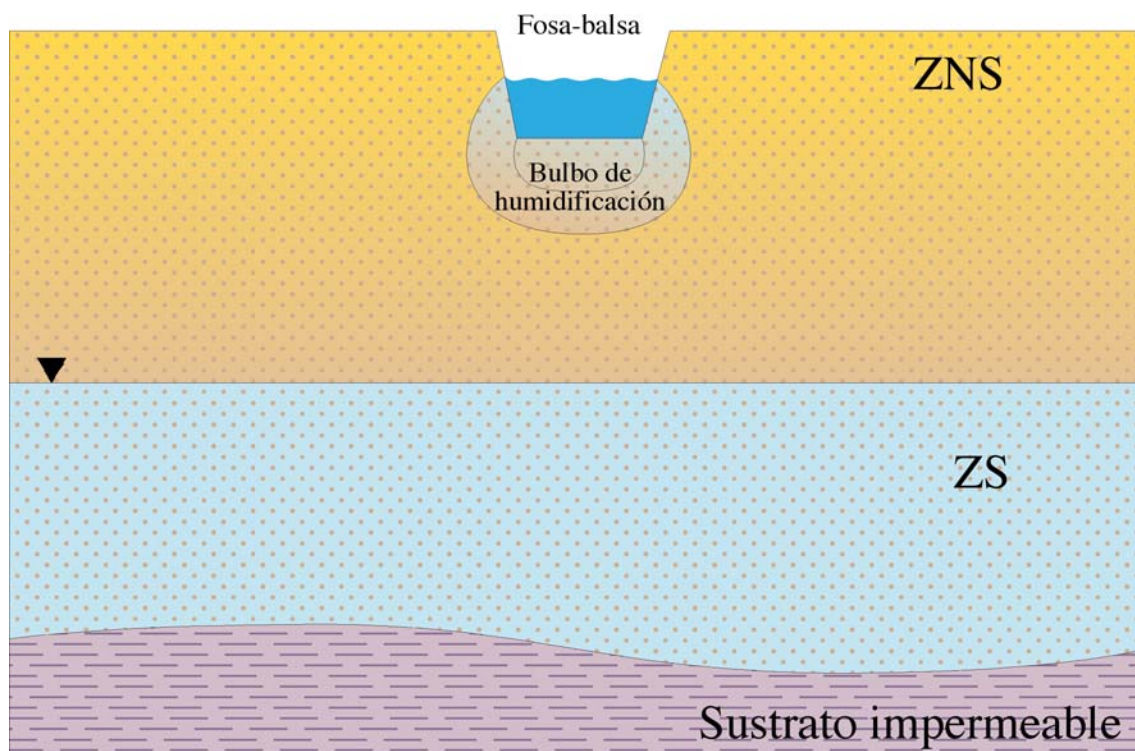


Fig. 1.07. Formación y avance del bulbo de infiltración.

En el caso de que se originen procesos de colmatación en el fondo de la balsa de recarga, la zona vadosa por debajo del nivel colmatante se encontrará no saturada, el agua penetrará por gravedad principalmente y la capacidad de infiltración aumentará con la profundidad.

En este caso, el flujo puede ser considerado unidimensional en la ZNS. A este respecto cabe señalar que en algunas experiencias empíricas de USA se ha constatado el efecto contrario, disminuyendo la velocidad de infiltración a medida que aumenta la profundidad (*Bouwer and Rice, 1989*).

La reducción de la velocidad de infiltración por niveles colmatantes conlleva un aumento de la eutrofización de las aguas.

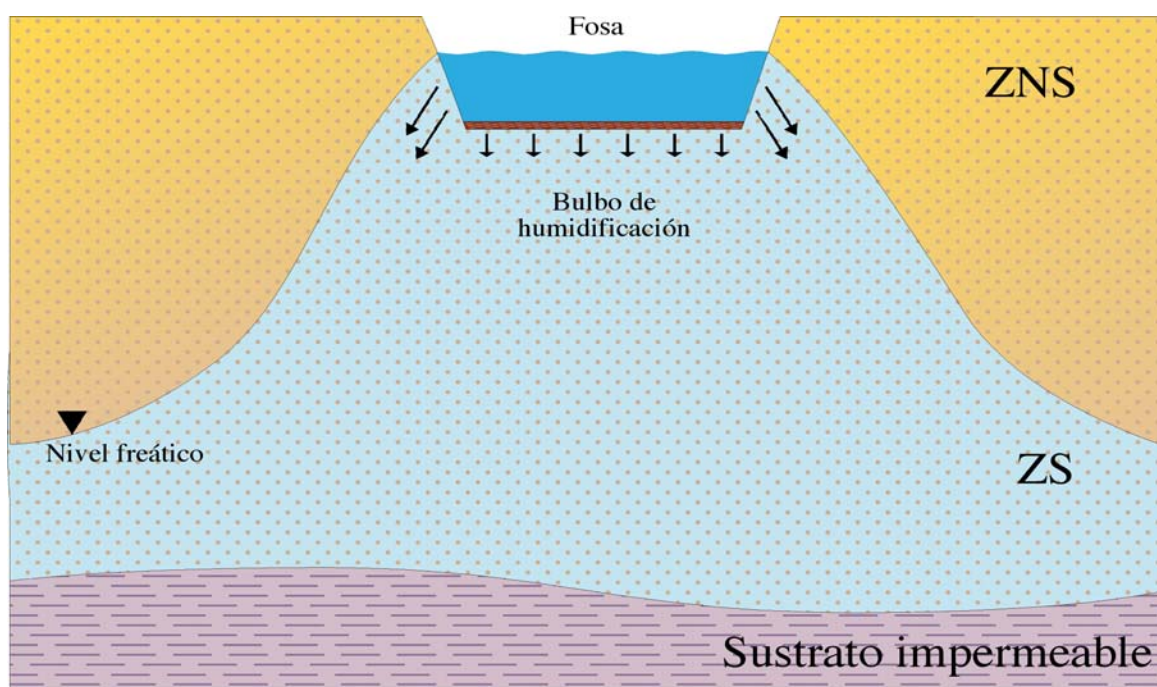
Algunos elementos de eutrofización de difícil control son la generación de algas unicelulares tipo *Carteria klebsii*, cuyo crecimiento es acelerado por la luz solar y genera *algal mats*. Durante este proceso aumenta el pH de las aguas, al tomar CO₂ disuelto durante su actividad fotosintética, con la consecuente precipitación de carbonato cálcico.

En la Fig. 1.09. la cresta o bulbo de humidificación ha alcanzado el control lateral (la zona de recarga queda comunicada hidráulica y temporalmente con la de descarga funcionando en régimen permanente) sin haber alcanzado el control vertical [el nivel freático no ha alcanzado el área filtrante (paredes con lámina de agua y fondo) del dispositivo de recarga artificial superficial (canal, fosa, balsa, etc.)]. De este modo, el crecimiento en altura puede proseguir hasta que se alcance el límite de control vertical (el nivel freático alcanza el fondo del dispositivo).

La generación de domos en la superficie piezométrica puede representar impactos ambientales significativos (inundaciones de cultivos, etc.), por lo que deben ser controlados mediante piezómetros, preferiblemente instrumentados, que aportarán además los datos precisos para la modelización del sistema.

- **Fase 3. Recarga en régimen estable**

Una vez se han alcanzado los límites de control vertical y lateral, el volumen de agua no varía y penetra en el acuífero un volumen de agua teóricamente similar al de descarga. El acuífero funciona teóricamente en régimen permanente (Fig. 1.10.).



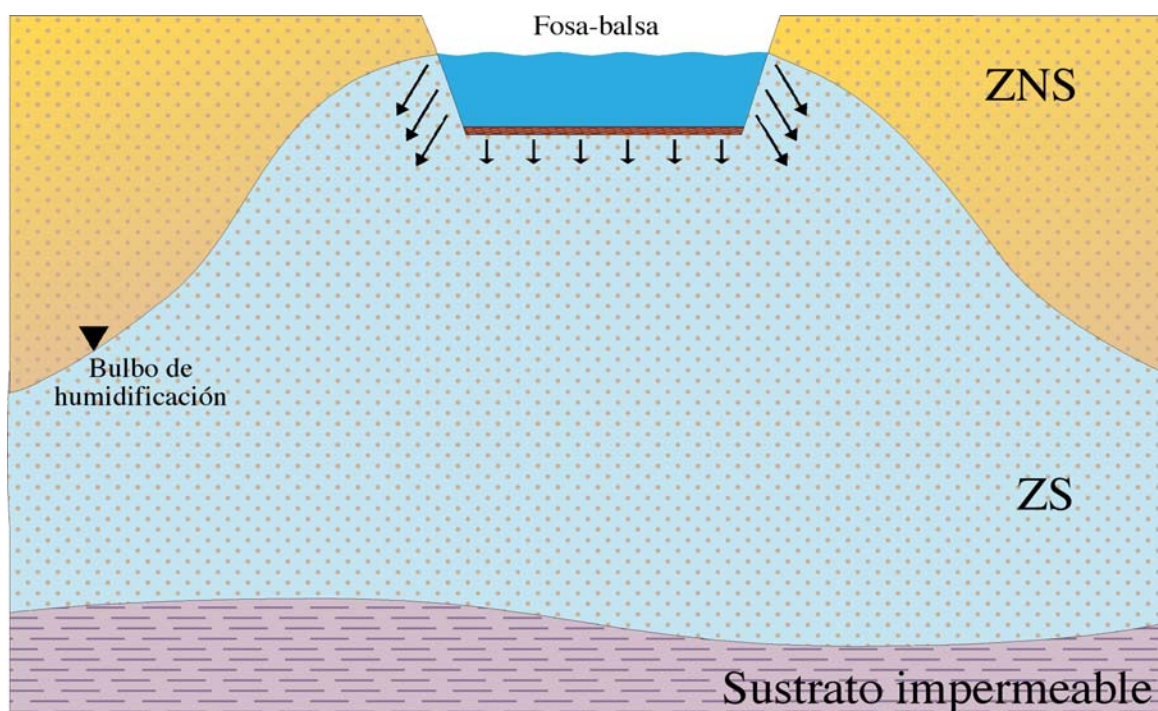


Fig. 1.08 a) y b). Abombamiento de la superficie piezométrica.

- **Fase 4. Desaparición de la cresta de agua al cesar la recarga**

El agua situada en almacenamiento por encima del nivel piezométrico se encuentra allí temporalmente. Al cesar la recarga se drena paulatinamente hacia los controles laterales hasta adaptarse a la superficie piezométrica natural.

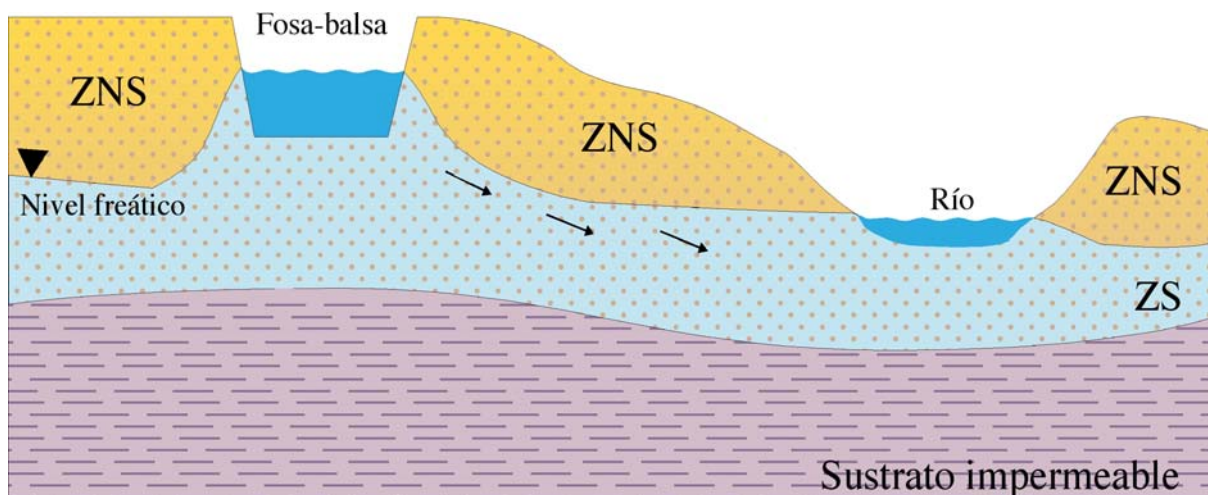


Fig. 1.09. Control vertical. La cresta ha intercomunicado el fondo de la balsa de infiltración con el nivel freático a través del bulbo de humidificación, que funciona como un nuevo nivel freático. Fuente: ITGE (1991).

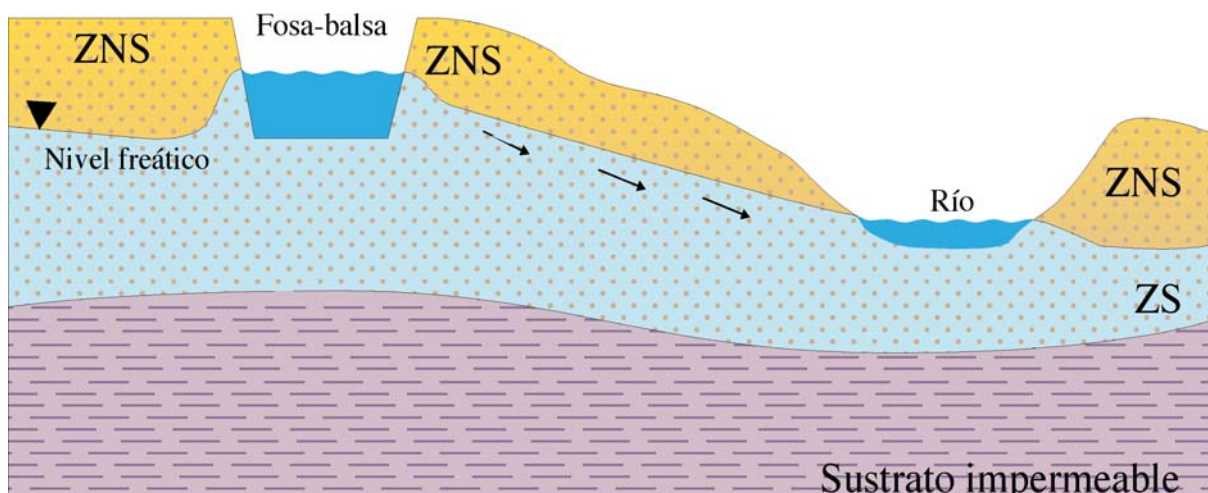


Fig. 1.10. Control lateral. La cresta ha alcanzado el cauce fluvial. El acuífero funciona temporalmente en régimen permanente, es decir, no hay variación en el almacenamiento o esta es muy ligera. Fuente: ITGE (1991)

3.1.2.6. **Sistemas de AR**

Se pueden resumir en dos tipos, sistemas de recarga en superficie y en profundidad.

- **Sistemas de recarga en superficie**

Consiste en extender el agua de forma que se alcance una gran superficie de contacto agua-terreno. Se suelen utilizar principalmente en acuíferos libres ausentes de niveles de baja permeabilidad próximos a la superficie del terreno (ITGE, 1991).

- **Sistemas de recarga en profundidad**

Consiste en introducir el agua en el acuífero mediante una serie de pozos o sondeos. Se emplea fundamentalmente en terrenos constituidos por una alternancia de niveles permeables e impermeables (acuíferos multicapa).

3.1.2.7. **Antecedentes históricos de sistemas de AR en España**

Los sistemas de recarga artificial en la Península Ibérica han sido empleados, al menos, desde la época árabe, como son los *careos* alpujarreños o el sistema de diques y boqueras levantinos (Díaz-Marta, 1989).

Los careos son, además de una vieja tradición, una técnica para el aprovechamiento de las aguas del deshielo de Sierra Nevada para alimentar a los acuíferos de las Alpujarras. Su origen se remonta al máximo esplendor de la época musulmana, siglos XIV y XV, cuando fue desarrollado un intrincado sistema de canalización y acequias para el aprovechamiento máximo del agua. Este sistema de riego y recarga artificial iba acompañado de un abancalamiento del terreno. Las acequias de careos reciben aportaciones en los tramos altos de los ríos, que son conducidas hasta las laderas de la sierra, y retenidas para favorecer su infiltración por el fondo del canal y en el terreno de labor (Fig. 1.11.).

Las boqueras levantinas se basan igualmente en sistemas de acequias de fondo no revestido que, en este caso, derivan aguas procedentes de cursos fluviales, no del deshielo

hacia los terrenos de labor (*Cano-Manuel y González Ayestarán, 2000*). Ambas definiciones se presentan en el Apéndice 2 (glosario).

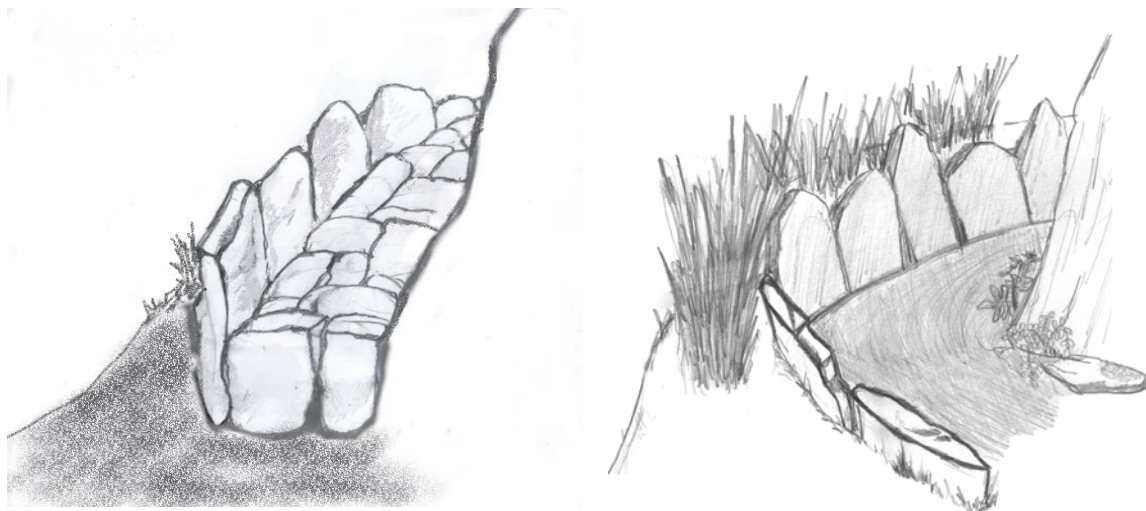


Fig. 1.11. Dibujos que describen la estructura constructiva de las acequias de careo en las Alpujarras (Granada). Algunas de estas acequias, que fueron construidas por los musulmanes hace más de 600 años para favorecer la infiltración del agua del deshielo de Sierra Nevada en los acuíferos de la vega, están perfectamente preservadas y sujetas a un régimen de organización y gestión específico (dibujos de Cano-Manuel y González Ayestarán, 2000, facilitados por cortesía del Grupo Tragsa de Granada).

Algunos sistemas específicos como los RBFs⁸ son todavía anteriores, existiendo citas incluso bíblicas, como veremos más adelante.

En la actualidad existen numerosos sistemas, algunos de aceptación general, cuya elección depende de las características del lugar a recargar, si bien existen otros específicos para algunas situaciones (sondeos en el centro de una laguna, etc.), (Fig. 1.12.).



Fig. 1.12. Sondeos en las inmediaciones de la laguna de Aguasal. La perforación fue realizada en la franja

⁸ River Bank Filtration. Técnica consistente en extraer agua de los cauces fluviales filtrada y tratada por el aluvial a través de pozos perforados o excavados fuera del cauce.

perilagunar. Complejo de humedales de Coca-Olmedo. En otros casos se detectan perforaciones en el cuenco desecado.

Entre los sistemas de mayor aceptación en los antecedentes consultados, destacamos los siguientes:

A). Instalaciones de recarga superficiales

Siempre que sea posible son preferibles los sistemas de infiltración superficial, ya que facilitan las labores de tratamiento de la colmatación y las técnicas de SAT⁹ (Bouwer, 2002).

Los sistemas de infiltración superficial requieren suelos permeables y zonas vadasas que permitan la introducción del agua en el acuífero, que éste sea libre y suficientemente transmisivo para permitir el flujo lateral sin una generación de domos excesiva en la superficie piezométrica.

De este modo, los “*mapas de suelos*” adquieren una importancia primordial en recarga artificial, al sintetizar varios elementos de importancia.

La velocidad de infiltración o de “*recarga*” en suelos francos (de escasa variabilidad granulométrica) sin colmatar ha sido tabulada por Bouwer, 1999 como sigue:

- Suelos arcillosos y/o margosos: < 0.1 m/día.
- Limos: 0.2 m/día.
- Limos arenosos: 0.3 m/día.
- Arenas limosas: 0.5 m/día.
- Arenas finas: 1 m/día
- Arenas medias: 5 m/día.
- Arenas gruesas: > 10 m/día.

La infiltración a través de un suelo saturado en agua está determinada por la ecuación de Green-and-Ampt (Green and Ampt, 1911), que es una aplicación de la ecuación de Darcy para suelos saturados. Su expresión es como sigue:

$$V_i = K \frac{H_w + L_f + h_{we}}{L_f}$$

Donde:

- V_i es la tasa de infiltración.
- K es la conductividad hidráulica de la zona humedecida.
- H_w es la profundidad del agua con respecto al suelo.
- L_f es la profundidad del frente del bulbo de humidificación.
- h_{we} es la capacidad de succión capilar o presión negativa en el frente del bulbo de humidificación.

⁹ ⁹Técnicas SAT o “Soil Aquifer Treatment” son aquellas que se aplican en el agua de recarga y/o medio receptor para aumentar la efectividad de las instalaciones de recarga artificial. Su estudio se lleva a cabo en el Bloque 5.

La ecuación no considera el aire disuelto, por lo que el resultado queda subestimado, si bien el parámetro h_{we} puede ser modificado de modo que el cálculo resultante sea más realista. Para ello *Bouwer et al, 1999*, proponen los siguientes parámetros para distintas litologías, según experiencias realizadas en infiltrómetros.

La h_{we} o capacidad de succión capilar propuesta por Bouwer (*en Bouwer et al, 1999*), para el frente del bulbo de humidificación, es:

- Arenas gruesas: -5
- Arenas de grano medio: -10
- Arenas de grano medio fino: -15
- Arenas y limos- limos arenosos: -25
- Limos: -35
- Arcillas estratificadas: -35
- Arcillas dispersas: -100

Los principales dispositivos empleados son:

- Serpenteos.
- Represas.
- Vasos permeables. Se trata de pequeños embalses en los que la cerrada es de permeabilidad media.
- Balsas.
- Fosas/canales/caceras.
- Campos de extensión (zonas regables).

Estas instalaciones pueden estar localizadas en el interior de los cauces (serpenteos, diques, represas, etc.) o fuera de los mismos (balsas, canales, campos de inundación, etc.), (*Murillo, 2002*).

• Instalaciones localizadas en el interior de los cauces

Estas instalaciones se basan en ralentizar la velocidad de flujo con objeto de aumentar el tiempo de infiltración y consecuentemente la tasa.

Los localizados en los cauces, como son los serpenteos y las represas, se basan en incrementar el tiempo y el área de contacto entre las aguas de recarga y el lecho del cauce.

Los **serpenteos** constan de una serie de muros, generalmente de tierra, con forma de “L” en planta, colocados alternativamente a una y otra orilla del río.

Las **represas** son estructuras que atraviesan el cauce transversalmente. Los criterios constructivos se basan en diques apoyados en el lecho mediante sistemas de cimentación por gravedad (*BOR, 1981*). Pueden ser de algún material permeable (fibrocemento, etc.) o bien de hormigón o barreras de goma hinchables. Este último tipo se emplea para evitar el peligro de desbordamiento que pueden ocasionar algunas avenidas.

• Instalaciones localizadas en el exterior de los cauces



Son dispositivos que funcionan esparciendo la lámina de agua sobre el terreno, con objeto de incrementar la superficie de infiltración.

- Vasos permeables.
- Balsas.
- Fosas/canales/caceras.
- Campos de extensión (zonas regables).

Los **vasos permeables** son pequeños embalses en los que la cerrada es de permeabilidad media.

Las **balsas** son dispositivos en general alargados y de escasa profundidad, donde la infiltración se produce predominantemente por el fondo.

Un módulo de balsas tipo tiene un número de balsas definido, tanto de infiltración como de decantación. Cuentan con elementos auxiliares, tales como diques separadores y caminos de servicio (*MIMAM, 2002*).

Los **canales, zanjas** de infiltración o **caceras** de recarga son dispositivos rectilíneos, contruidos siguiendo la topografía del terreno. El módulo longitud/anchura es muy superior al de las balsas. La infiltración se produce tanto por el fondo como por las paredes.

En cuanto al diseño de las zanjas, no existe *quórum* entre los diferentes autores, lo que induce a pensar que los sistemas deben ser específicamente diseñados para cada ámbito.

Su magnitud está condicionada por factores tales como propiedades de la ZNS, volumen retenido en la zona vadosa, geometría y perímetro mojado del canal, niveles colmatados y temperatura del agua.

No obstante, parece haber algunos criterios comunes:

Si la profundidad del nivel del agua bajo el canal es superior al doble de la anchura del mismo, la infiltración puede alcanzar valores máximos (*Bouwer and Maddock, 1997*). Si el fondo del canal está fuertemente colmatado, puede producirse una desconexión hidráulica entre el canal y el acuífero (*Stephens, 1996*).

Si el espesor de la ZNS es menor en la zona de recarga (junto al canal) que en las adyacentes, las condiciones para la infiltración son más propicias (*Winter, 1983*).

En zonas áridas y semiáridas, el nivel del agua suele quedar por debajo de la base del canal o dren, siendo por tanto la infiltración la principal fuente de recarga (*Stephens, 1996*).

Según algunas experiencias realizadas en Holanda, las zanjas de infiltración deben tener una pendiente máxima de 3:1 con objeto de evitar la sobrecarga de arena en los bordes. La profundidad deseable ronda los 15 m, y debe contar con un sistema de tuberías adicionales para el control del volumen de recarga y operaciones de gestión y mantenimiento (*Mills, 2002*).

En USA, las zanjas de recarga en la zona vadosa deben contar con al menos 1 metro de anchura y 5 m de profundidad, y estar rellenas de arena gruesa o gravilla (zanjas

drenantes). El agua se suele aplicar a través de una tubería perforada rodeada de un empaque (Bouwer, 2002).

Por ejemplo, en el caso de Ámsterdam, la recarga del acuífero del sistema dunar se realiza mediante canales y drenes de 1 m de profundidad y 20 m de longitud, consiguiendo una tasa de infiltración promediada de 20 cm/día. La mayor tasa de infiltración se produce por el centro de la zanja (Olsthoorn, 2002).

Las zanjias deben ser cubiertas para evitar la luz solar y la afección que puedan provocar a la fauna y al hombre, además de minimizar su impacto visual (Hantke, 1983).

Uno de los principales problemas asociados ha sido el incremento de salinidad de las aguas, en parte debido a problemas de intrusión marina o bien por envejecimiento de las aguas, contaminando los suelos y afectando directamente a la vegetación psammófila (=arenófila)(Olsthoorn, 2002).

La Fig. 1.13 esquematiza el funcionamiento de una fosa o balsa de infiltración.

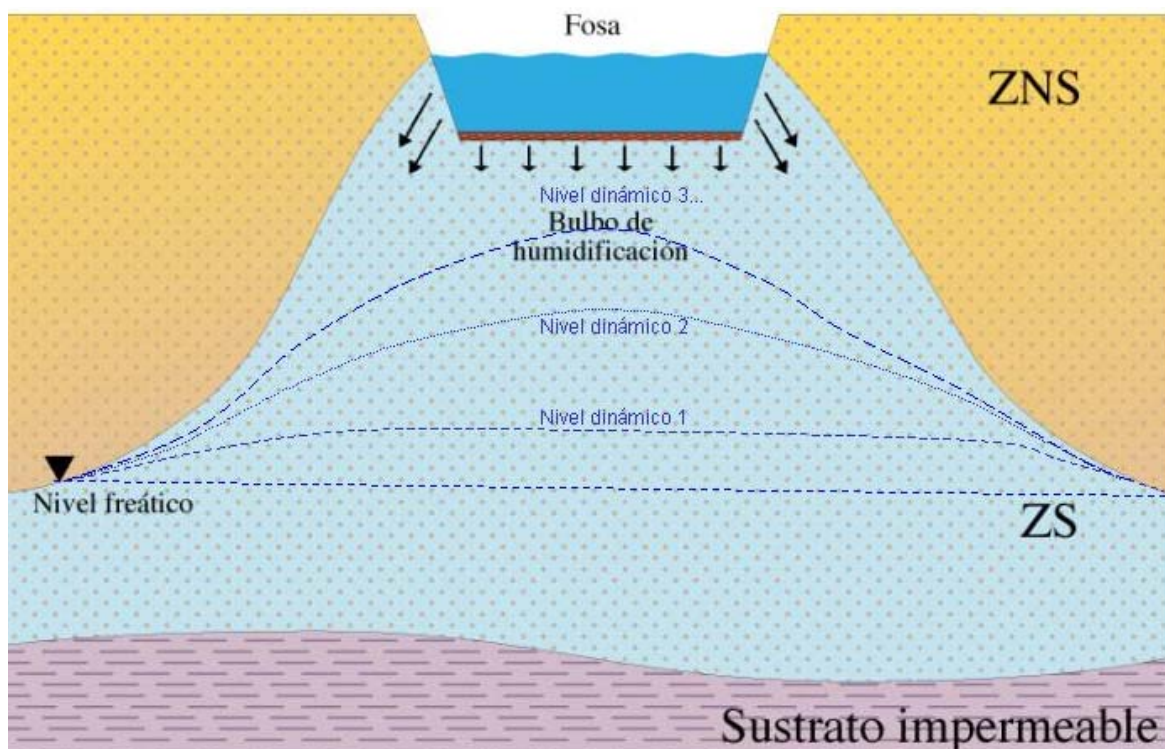


Fig. 1.13. Esquema del funcionamiento de una fosa. Fuente: ITGE (1991)

Los **campos de extensión o inundación** son campos de labor sobre los que se aplican elevadas dotaciones de forma intencional, de modo que los retornos de riego sean altos. Esta técnica sólo es posible en situaciones de excedencia hídrica.

La Fig. 1.14. se presenta a modo de ejemplo y corresponde al canal del río Gorgos, Jávea (Alicante).

- **Ventajas e inconvenientes de los sistemas de recarga superficiales**



Las principales ventajas e inconvenientes, obtenidos de distintas experiencias de sistemas de recarga superficiales, pueden ser consideradas específicas para cada situación. No obstante hay algunos genéricos, entre los que subrayamos:

- Precio y disponibilidad del terreno. Dependiendo de la disponibilidad de terreno puede resultar muy difícil, incluso imposible establecer estos sistemas en una zona poblada o muy cultivada, por no disponer de espacio o por la carestía del suelo. Estas operaciones precisan en general terrenos rústicos y baratos (*ITGE, 1991*).
- Factores estéticos y ambientales. Las instalaciones requieren de estructuras adicionales, como pueden ser los cercados y vallas de protección y seguridad, caminos de servicio, pasos elevados, etc. Su ubicación en terrenos rurales conlleva la necesidad de espacio suficiente para el tránsito de tractores, cubas, cosechadoras, etc., y evitar el “efecto barrera” de las estructuras de recarga, tubería de conducción, etc. (*MAPA, 2000*). En determinadas situaciones pueden además presentar problemas de proliferación de insectos y roedores (*ITGE, 1991*).
- Impactos inherentes a la construcción de instalaciones. Puede ser preciso realizar expropiaciones previas, acondicionar el terreno, realizar nivelaciones, desmontes y terraplenes, compactación de tierras, retirar coberturas poco permeables o arcillosas superficiales, retirar vegetación. A estos hay que añadir impactos derivados del transporte de materiales, movimiento de maquinaria pesada, acopio de materiales, vertido de desechos, bien sean temporales (incluidos los ruidos, polvo atmosférico y gases por combustión de maquinaria en los movimientos de tierra), o permanentes (*MAPA, 2000*).
- Impactos inherentes a la presencia de las instalaciones: La estructura de recarga introduce una serie de “elementos extraños” en el medio, como pueden ser los dispositivos de disipación de energía para evitar el efecto del golpe de ariete, estructuras metálicas (piezas transversales y vigas de sujeción con sus correspondientes estribos y zapatas), tuberías, desagües, válvulas de compuerta, chimeneas de desaireación, paradas y diques de hormigón armado, depósitos para el caudal de recarga, planta de pretratamiento, etc. (Fig. 1.17.). A estos hay que añadir, al menos, los materiales en forma de materias (hormigón, ladrillos, tuberías de fibrocemento, etc.).
- Impactos inherentes a los trabajos de conservación (fase de explotación).
- Colmatación. Los problemas derivados de la colmatación son generalmente pequeños, si bien representa un tipo de residuo permanente que debe ser conducido a vertedero durante las operaciones de mantenimiento.
- Pérdidas por evaporación. En determinados casos pueden ser importantes, de ahí la recomendación de tapar las estructuras de recarga, con la ventaja de conseguir una evaporación prácticamente nula (*Bouwer, 2002*).
- Requisitos de calidad del agua. En caso de ser preciso un pretratamiento del agua adicional al filtrado, la instalación de plantas de este tipo suponen un impacto por ocupación del terreno y por la necesidad de tendidos eléctricos para su funcionamiento.

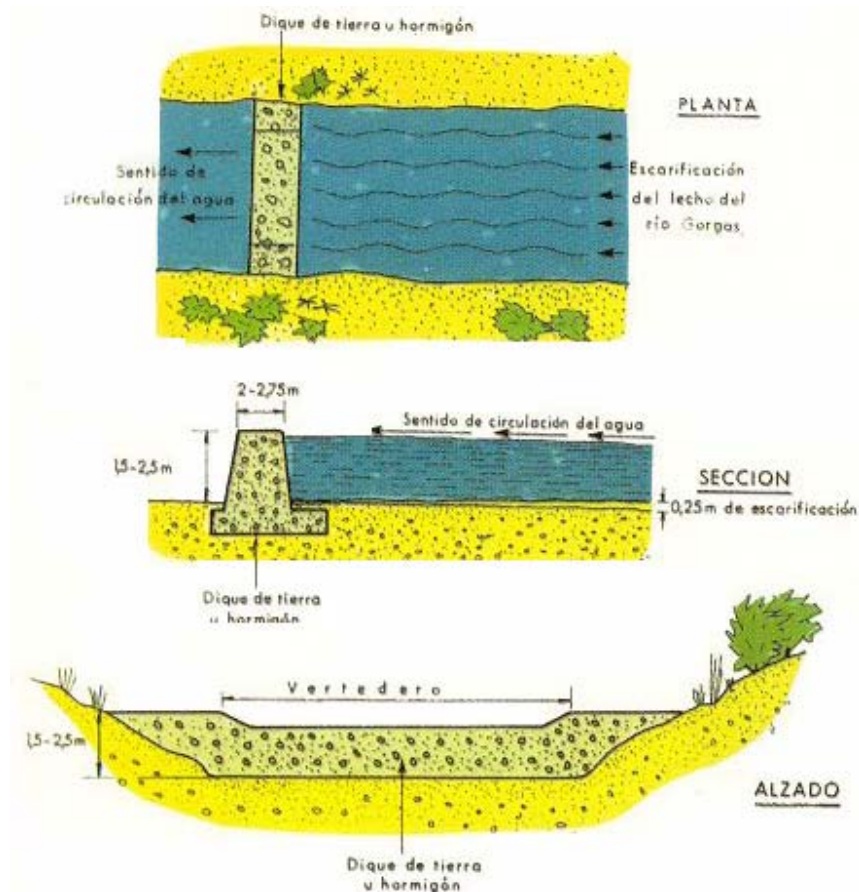


Fig. 1.14. Ejemplo del dispositivo de recarga del cauce del río Gorgos, Jávea (Alicante) (modificado de Armayor et al, 2001).



Fig. 1.15. Efecto barrera del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste.



Fig. 1.16. Aspecto del camino de servicio del caz de recarga artificial superficial del dispositivo de la Cubeta de Santiuste (Segovia).



Fig. 1.17. Ejemplo de impactos inherentes a la construcción de la estructura de recarga. Removilización del terreno, tránsito de maquinaria, introducción de elementos extraños, polvo, ruido, afcción a la vegetación, etc.

En cuanto a la eficiencia de los dispositivos superficiales, conviene destacar los experimentos desarrollados en Arizona para comprobar la efectividad de zanjas, balsas y pozos de inyección. Todos estos dispositivos fueron integrados en una zona de experimentación o ARF (*Aquifer Recharge Facility*), con 20 piezómetros de observación para el seguimiento de la piezometría y evolución del quimismo del suelo y en las aguas subterráneas.

Los resultados indicaban que la mayor eficiencia fue la de los dispositivos tipo zanja o embalse, mientras que los pozos de ZNS y las balsas mostraron problemas de colmatación muy importantes en poco tiempo (*Legg & Sagstad, 2002*).

B). Instalaciones de recarga en profundidad

Instalaciones diseñadas para introducir el agua en el acuífero mediante una serie de pozos o sondeos. Suelen ser empleadas en terrenos inadecuados para el uso de sistemas superficiales, bien sea por escasa disponibilidad de espacio o por tratarse de acuíferos poco transmisivos o con alternancia de niveles permeables e impermeables (acuíferos multicapa), si bien no dejan de ser una técnica además de alternativa, complementaria a la recarga superficial.

Cabe destacar los siguientes:

- Sondeos de inyección.
- Inyección en simas y dolinas.
- Drenes y galerías.
- Almacenamiento y recuperación de acuíferos o *Aquifer Storage and Recovery* (ASR).

• Sondeos de inyección

La recarga mediante pozos profundos es una tipología muy extendida, al requerir escasa disponibilidad de espacio (Fig. 1.18.).

En acuíferos multicapa afectan directamente a los niveles piezométricos de los materiales situados a una cierta profundidad.

En el caso del acuífero de los Arenales, el caudal específico medio de recarga mediante sondeos se ha estimado en 0,25 l/s por metro de ascenso. Este valor es inferior a los caudales específicos de bombeo, si bien es una práctica empírica habitual y recomendable (*MIMAM, 2002*). En este mismo contexto y de forma simplificada, se supone que el nivel freático en las zonas a recargar, y a las profundidades involucradas por los pozos, se encuentra a 40 m de la superficie como mínimo, de modo que cada pozo recargaría un caudal de 10 l/s.

Los problemas de colmatación en los pozos ocurren con mayor rapidez que en las balsas y canales, por tanto, la calidad del agua debe ser adecuada. Los pozos deben estar equipados para llevar a cabo operaciones de limpieza por bombeo, generando una circulación inversa. Por este motivo y en general, las operaciones de limpieza y regeneración son más difíciles y costosas.

Uno de los parámetros artificiales empleados para el seguimiento de la actividad es la relación entre el caudal inyectado y el ascenso del nivel freático:

$$Q_e = Q_{iny} / \text{ascenso nivel pozo}$$

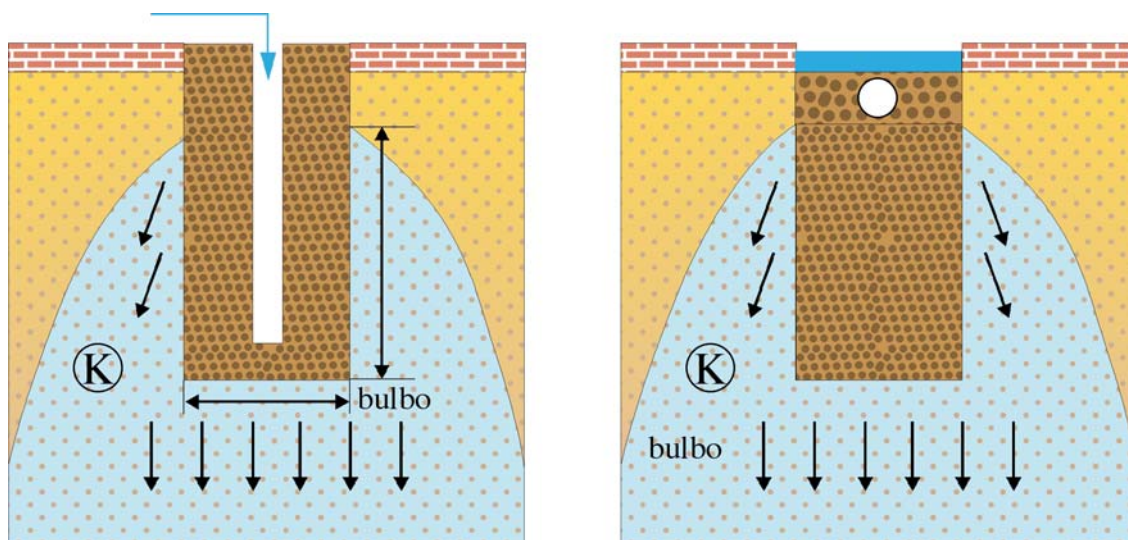


Fig. 1.18. Esquema sintético de recarga de la zona vadosa mediante pozos de recarga con un macizo filtrante, tubería de llegada del agua de recarga o bien de extracción y aislamiento de la superficie. La flecha azul simboliza la entrada de agua al dispositivo. Las flechas corresponden a líneas de flujo. La letra K al bulbo de humidificación.

- **Inyección en simas y dolinas**

Práctica extendida en zonas kársticas, que cuenta con el inconveniente de presentar problemas de colmatación si el agua no es pretratada.

El agua originaria suele ser de un cauce fluvial. Especial mención merece la experiencia realizada entre Alcázar de San Juan y Argamasilla de Alba (Ciudad Real), en la cuenca alta del río Guadiana entre febrero y abril de 1997, donde fueron derivados caudales importantes del cauce fluvial en un año especialmente húmedo, que eran introducidos en el acuífero kárstico mediante sondeos de recarga contruidos y diseñados para tal fin. Aunque el resultado fue bueno, no pudo llevarse a cabo en años consecutivos por carencia de un caudal suficiente en el río Guadiana.

- **Drenes y galerías**

Instalaciones similares a las zanjás, con la diferencia de que han sido incomunicadas de la superficie, por problemas de disponibilidad de espacio y por incomunicar el agua de recarga del contacto directo con el aire, para evitar su disolución.

- **Almacenamiento y recuperación de agua en acuíferos [Aquifer Storage & Recovery (=ASR)]**

El *Aquifer Storage Recovery* (ASR) es una tecnología para el almacenamiento de grandes volúmenes de agua subterránea a través de sondeos cuando hay disponibilidad de la misma, y su recuperación a través de los mismos sondeos cuando sea preciso (Pyne, 1995).

Representa una alternativa efectiva, y de bajo coste, al permitir el almacenamiento de aguas en épocas con excedentes hídricos y agua de calidad, y su recuperación en períodos

secos o de pobre calidad. Las zonas de almacenamiento suelen ser acuíferos que han experimentado fuertes descensos en su volumen de almacenamiento por bombeo para riego y abastecimiento (Pyne, 1998).

El almacenamiento bajo tierra de grandes volúmenes elimina la necesidad de grandes reservorios superficiales. En determinadas ocasiones se ha empleado como barrera contra la contaminación (CSIRO, 2002).

Se trata de una tecnología relativamente nueva que fue iniciada a finales de la década de 1940 por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), sin que los ensayos fueran culminados. La primera estructura operativa empezó a funcionar en New Jersey en 1969. en 1983 había tres dispositivos en USA. En febrero de 2002 había 53 sistemas de ASR operativos (Pyne, 2003, en <http://www.asrforum.com/frames/wherefr.html>). A esta cifra hay que añadir cerca de una centena de instalaciones en proyecto u operatividad en el resto del mundo (<http://www.iah.org/recharge>).

Las experiencias obtenidas tras varios años de operatividad son consideradas, en general, positivas (Martin & Dillon, 2002), y económicamente satisfactorias (Dillon, 1996).

La Fig. 1.19 ilustra un ejemplo de instalaciones de ASR. En la época húmeda es acumulada en humedales o estanques, donde reciben un tratamiento básico, para posteriormente ser bombeadas dentro del pozo e inyectadas al acuífero. En la época seca puede ser recuperada, dependiendo de las necesidades.

La respuesta de los acuíferos a la ASR es muy variable, de modo que es controlada por el grado de fracturación, o el porcentaje de matriz y cemento en su contenido, condicionantes directos de la porosidad. En este contexto, los procesos físicos y geoquímicos pueden representar un impacto ambiental directo (Gale et al, 2001). La modelización se perfila como una alternativa para minimizar estos impactos.

A pesar de tratarse de una tecnología de vanguardia y alta viabilidad, alternativa al almacenamiento superficial, hay que tener en cuenta los procesos de interacción agua-roca como importante modificador de la calidad inicial de las aguas, que puede acarrear repercusiones en la salud humana (Arthur et al, 2002).

La introducción de agua en el acuífero motiva una compresión del mismo por sobrebombeo, la cual resulta irreversible en la mayoría de los casos (Bouwer, 1978).

Las Figs. 1.20 a 1.24 corresponden a distintos aspectos de estructuras tipo ASR construidas en Adelaida, Australia.

En el próximo apartado se muestra un breve sumario del grado de desarrollo e implantación de instalaciones de AR y ASR en los distintos continentes.

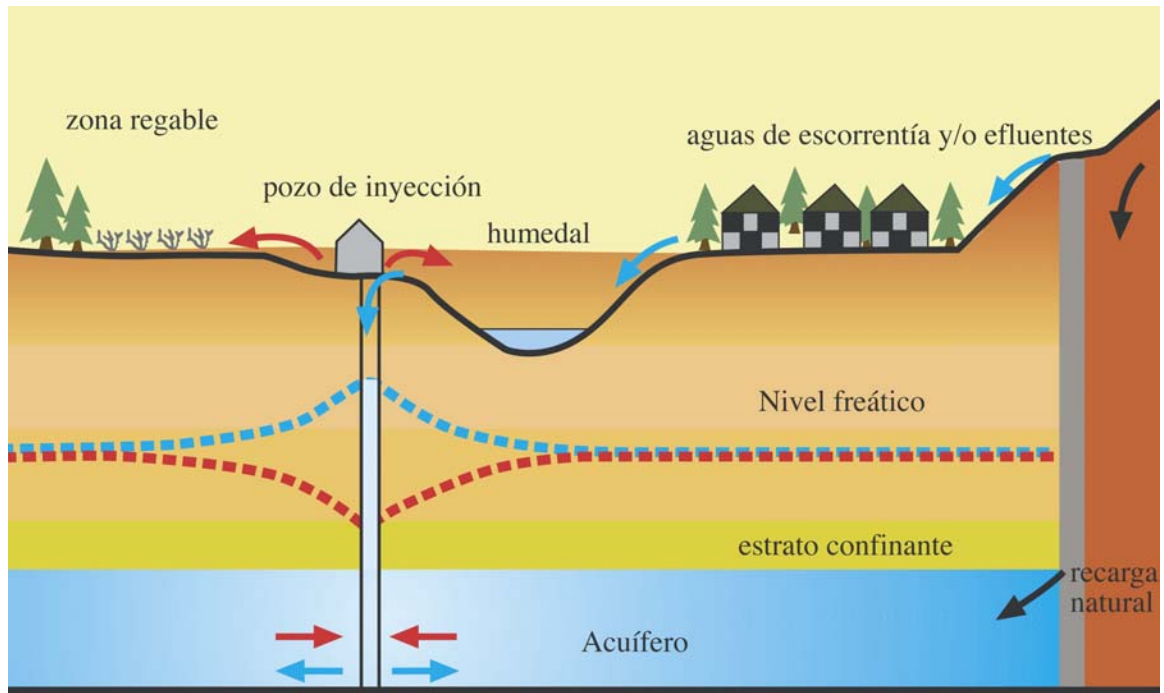


Fig. 1.19. Ejemplo de una instalación ASR tipo. Bolivar, Adelaida, Australia. (Basado en CGS, 1996).



Figs. 1.20. Estructuras ASR.. Emplazamiento de Bolivar, Adelaida, Australia del Sur.



Figs. 1.21)y 1.22). Estructuras ASR. Adelaida, Australia del Sur. Emplazamiento de Bolivar.



Figs. 1.23) y 1.24). Estructuras combinadas con la permanencia de humedales. Arriba: Véase el caudalímetro con vertedero en escalón intercalado y empleo de rejillas para proteger la calidad del agua y minimizar otros impactos. Abajo: Gran parte de estos dispositivos son aplicables a los sistemas de AR superficiales.

C). Instalaciones mixtas



- Pozos colgados o que intercomunican un acuífero colgado con otro infrayacente.
- Utilización conjunta de zanjas drenantes/balsas/canales y sondeos.
- Drenes subterráneos.
- Filtración en el lecho de los ríos o *River Bank Filtration* (RBF).

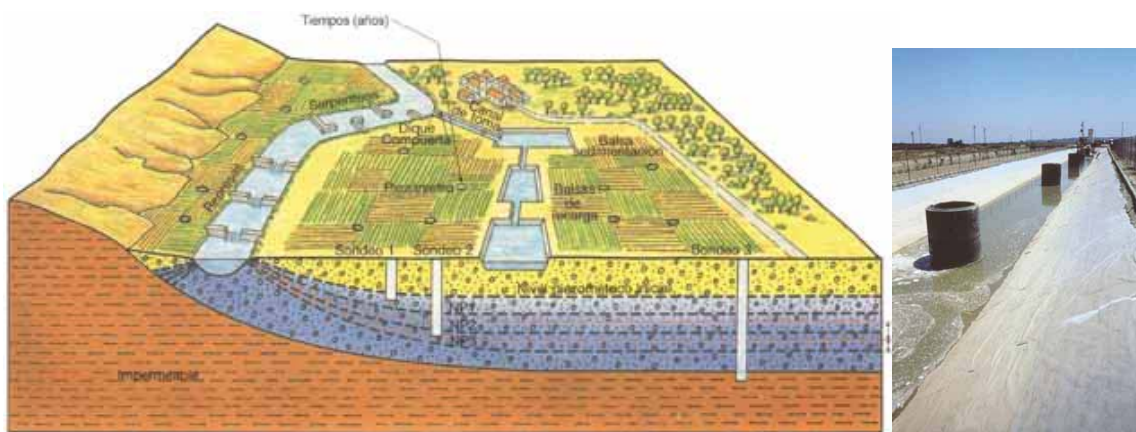
- **Pozos colgados**

La técnica consiste en perforar sondeos que intercomunican niveles acuíferos diferenciados en la vertical (acuíferos multicapa). Mediante la recarga, bien sea directa focalizada o inducida, se produce un descuelgue del agua hacia compartimentos inferiores del acuífero. Se trata por tanto de una técnica para recarga profunda.

- **Utilización conjunta de zanjas drenantes/balsas/canales y sondeos**

Se trata de agrupar y combinar distintos elementos descritos, como pueden ser canales de recarga con drenes y sondeos de inyección o bien pozos colgados.

Las Figs. 1.25. y 1.26 ilustran un ejemplo de utilización conjunta.



Figs. 1.25). y 1.26). Ejemplo de utilización conjunta de canales y sondeos. (Tomado de IGME, 2001).

- **Drenes subterráneos**

Un sistema recomendable que ha dado buenos resultados en experiencias desarrolladas en Ginebra (Suiza), para el caso de no existir problema de disponibilidad de espacio, consiste en la creación de un sistema de retención del agua del río, especialmente en tramos en que éste es perdedor. Este sistema se ubica a 7 m del río para minimizar impactos ambientales genéricos. Desde él se dirige a una planta de pretratamiento del agua de recarga, donde pasa por tres filtros consecutivos. Más tarde se procede a su distribución a través de un sistema de drenes subterráneos ampliamente extendidos. El sistema puede ser automatizado y precisar de dos operadores para supervisar su efectividad, sin que haya presentado problemas de colmatación destacables en sus 22 años de efectividad (*De los Cobos, 2002*).

- **Filtración en el lecho de los ríos o RBF**



La recarga directa desde el lecho del río o RBF (River Bank Filtration) es una técnica que se está experimentando en numerosos lugares del mundo con buenos resultados (*Haas et al, 2003*).

Su origen se remonta a experiencias para combatir las epidemias que asolaron Europa en la década de 1890, siendo un buen ejemplo las estructuras generadas en Hamburgo en 1892 para combatir una epidemia de Cólera (*Hubbs et al, 2003*).

Con anterioridad se ha detectado que ha sido una práctica extendida desde la antigüedad. A este respecto cabe mencionar una cita bíblica:

“Y Moisés y Aarón hicieron como Jehová lo mandó; y alzando la vara hirió las aguas que había en el río, ...; y todas las aguas que había en el río se convirtieron en sangre.

Asimismo los peces que había en el río murieron; y el río se corrompió, que los Egipcios no podían beber de él:

*...
Y en todo Egipto hicieron pozos alrededor del río para beber, porque no podían beber de las aguas del río.”*

En Éxodo 7, 20-24.

Consiste en inducir la infiltración en el lecho del río induciendo un gradiente por bombeo desde un pozo cercano. Al igual que en la mayoría de los casos, el inconveniente principal es la génesis de procesos colmatantes (tanto *biofilms* como relleno de los poros por partículas de arcilla, limo o carbono orgánico), y además la acumulación de metales y compuestos orgánicos en el lecho.

La conductancia del lecho y la capacidad de depuración está condicionada, entre otros factores, por la distribución de los granos del acuífero, la calidad del agua y la temperatura. Los procesos colmatantes reducen la capacidad de infiltración del lecho, pero también contribuyen a la biodegradación de contaminantes.

Es preciso disponer de puntos de muestreo perforados en el cauce del río y en la zona entre el río y el pozo de bombeo (*Grischek et al, 2002a*).

Los beneficios que aporta esta técnica son (*Haas et al, 2003*):

- Extracción de partículas en suspensión y patógenos del agua.
- Extracción de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos.
- Dilución de vertidos contaminantes.
- Reducción en la aplicación de productos químicos para desinfección y tratamiento o DBPs.
- Producción de un agua estable y equilibrada iónicamente.

Las instalaciones tipo difieren sustancialmente de los pozos de bombeo tradicionales perforados en aluviones, al llevar asociadas, por lo general, estructuras complementarias al sondeo principal.

La Fig. 1.27 presenta los componentes típicos de un pozo vertical.



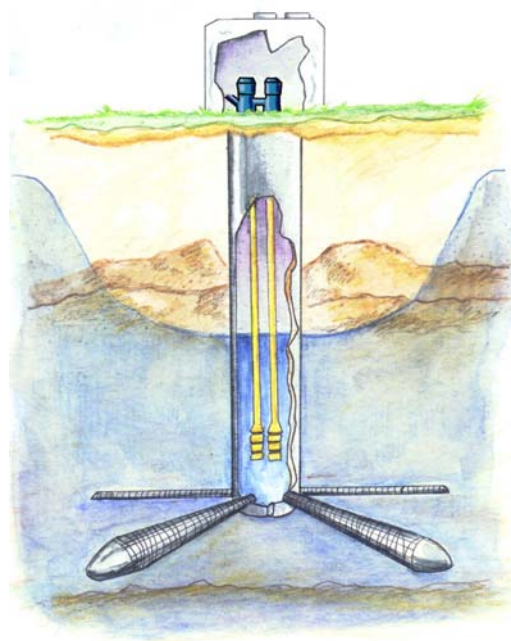


Fig. 1.27. Pozo de drenes radiales típico de estructuras tipo RBF, (modificada de Hunt, 2003).

Como recomendaciones constructivas hay que considerar los siguientes criterios (Hunt, 2003; Haas et al, 2003):

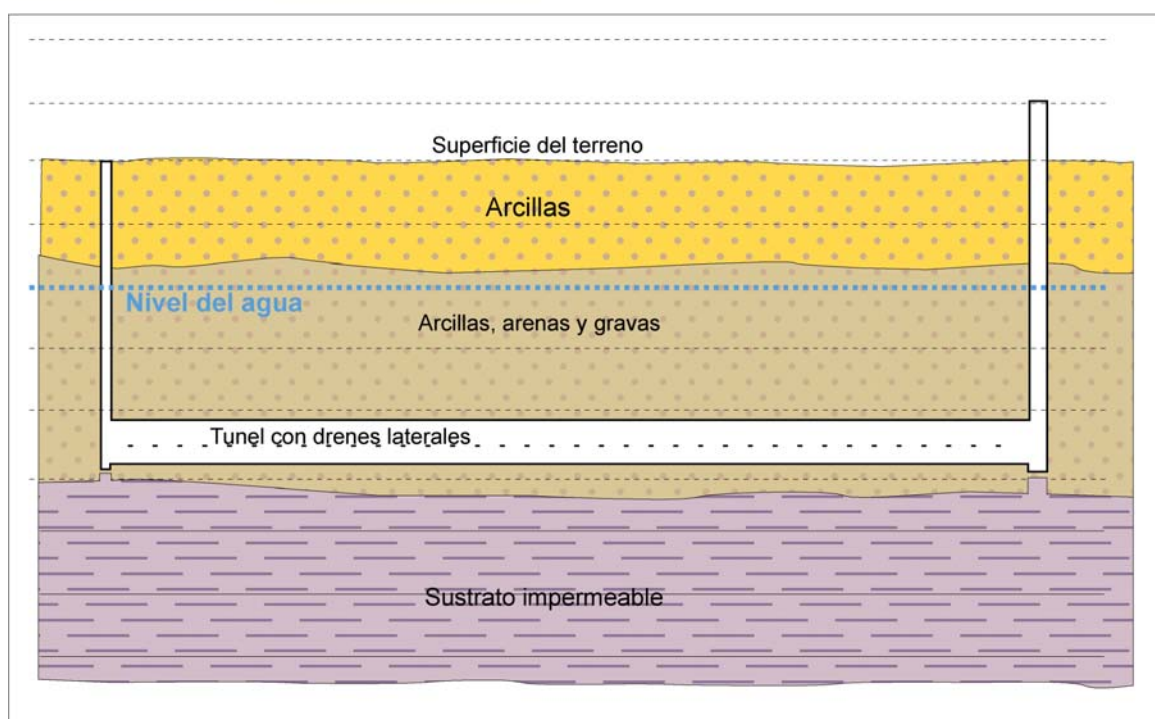
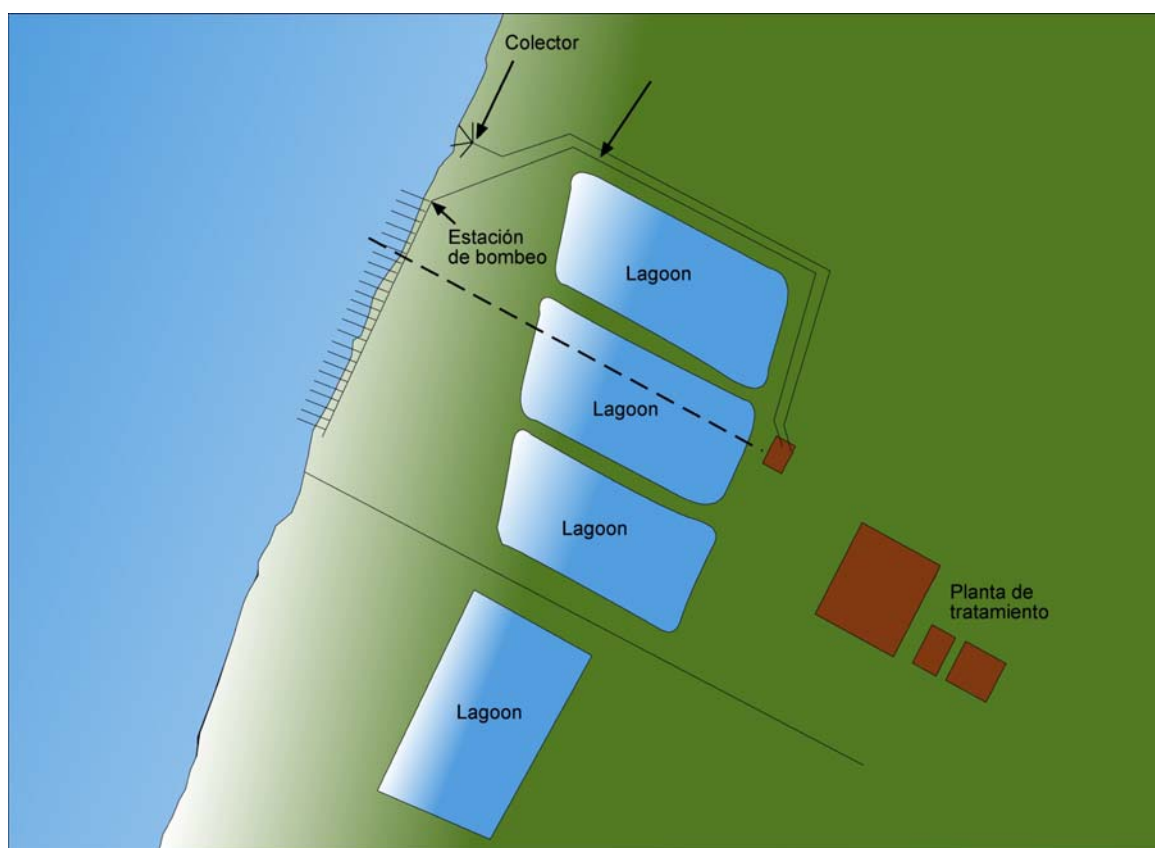
- Perforaciones de gran diámetro.
- Análisis granulométricos practicados en los testigos de los sondeos.
- Perforación en testigo continuo en el sustrato del aluvial.
- Examen geológico detallado en los afloramientos cercanos.

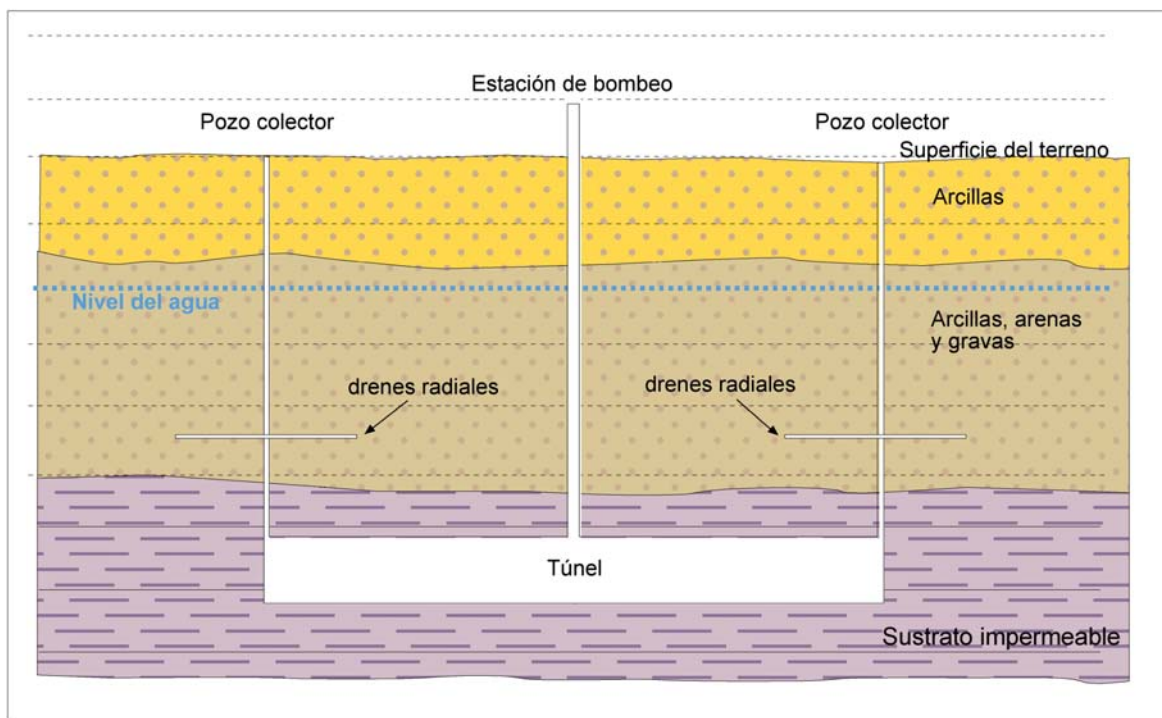
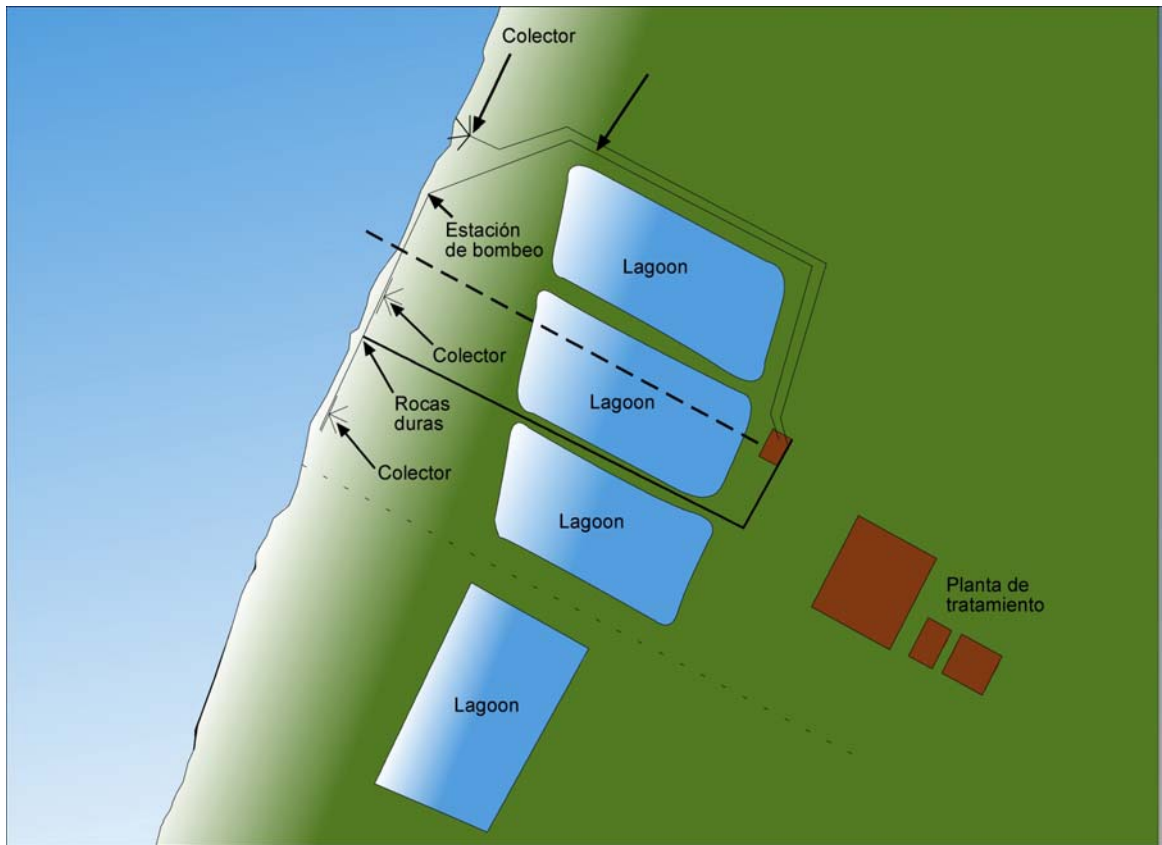
En cuanto al mantenimiento de las estructuras, destacamos la limpieza de las tuberías y rejillas de los tramos filtrantes.

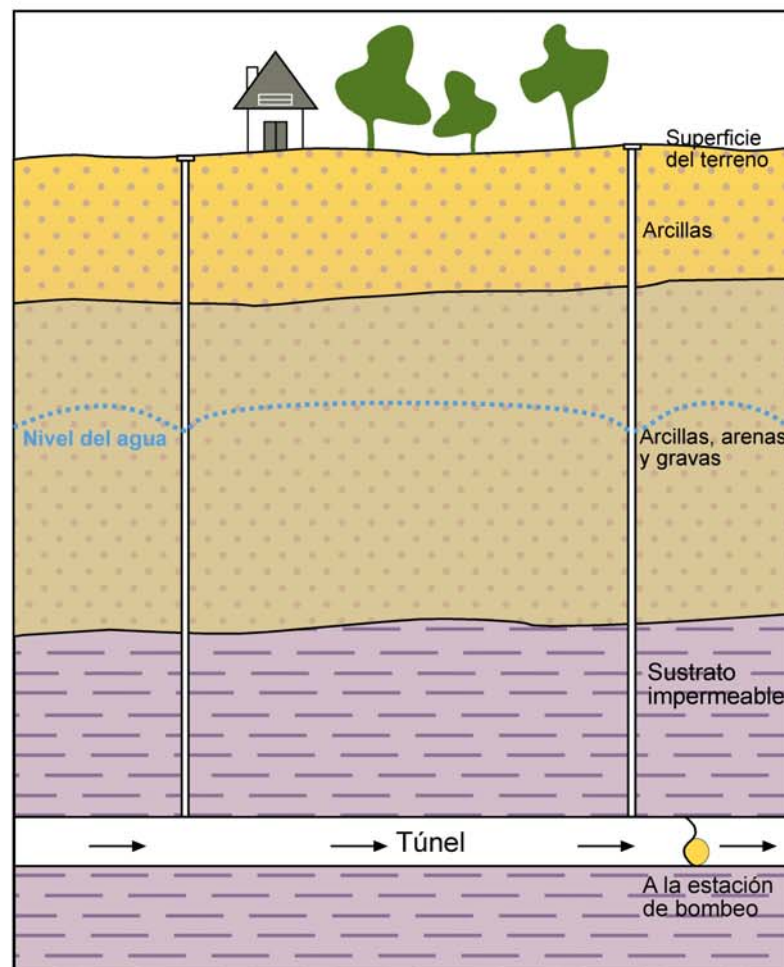
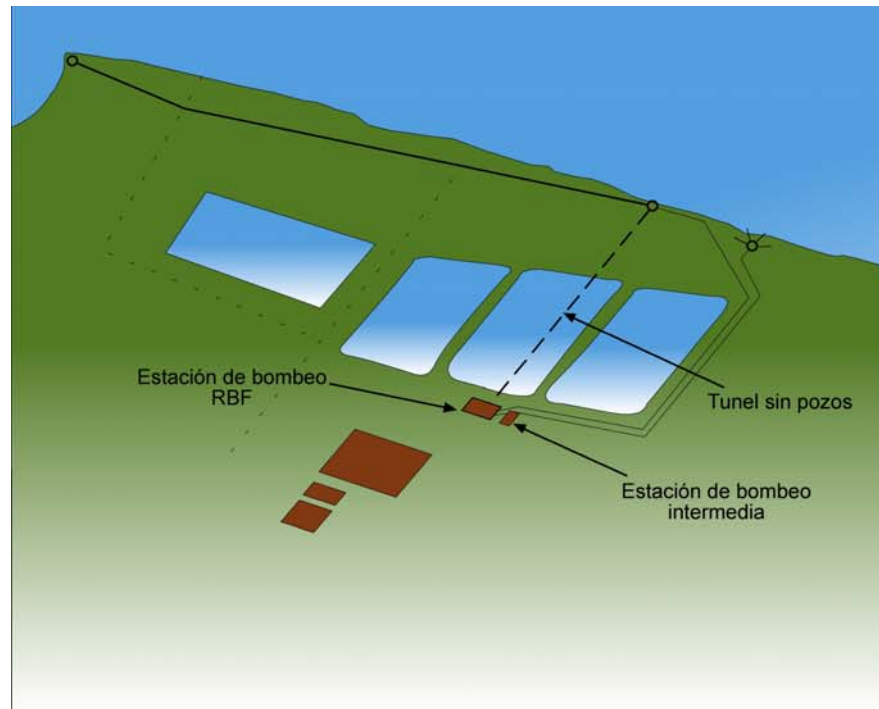
Una opción practicada en la actualidad es la implantación de tuberías aisladas dentro del túnel, de modo que se utilizan alternativamente, permitiendo la limpieza de la otra. Esta técnica es conocida como *wet-dry* o alternancia de humidificación y secado (Haas et al, 2003).

Las técnicas constructivas de estructuras RBF incorporan túneles en el diseño de las instalaciones, que suelen ser del siguiente tipo:

- Túnel horizontal excavado en materiales aluviales poco consolidados (Fig. 1.28 a).
- Instalación de colectores horizontales interconectados para rocas más competentes (Fig. 1.28 b).
- Colectores verticales intercomunicados por un túnel (Fig. 1.28 c).







Figs. 1.28 a) a c). Concepto de túnel subterráneo en materiales blandos; en materiales duros cubiertos por otros blandos y en rocas duras respectivamente (Inspirado en Haas et al, 2003).

D). Instalaciones de recuperación

Las instalaciones de recuperación son, en general, pozos de recuperación, bien perforados para su utilización conjunta o mancomunada, o bien son los propios pozos de riego, de propiedad particular, diseminados en “campos de bombeo.”

En algunas instalaciones tipo Aquifer Storage & Recovery (ASR) o River Bank Filtration (RBF) resulta preciso crear estructuras de extracción, conducción y distribución, mientras que en casos como la recarga artificial superficial, la mejor alternativa se basa en la utilización conjunta por parte de los interesados de las captaciones más favorecidas por las operaciones de AR. Este proceso resulta viable en los casos de concentración parcelaria o iniciativas gubernamentales para el beneficio de los consumidores de una determinada región.

Para objetivos medioambientales, los pozos de recuperación o humedales conectados con el circuito mediante dispositivos de recarga inducida, se considera que actúan en aras del interés general, y su explotación y mantenimiento debe estar coordinado y subvencionado por la Administración o bien por los principales interesados.

Un término técnico específico para instalaciones de recuperación es la **eficiencia en la recuperación, RE o Recovery efficiency** (Pyne, 1995). Se define como el porcentaje del volumen de agua almacenado que es recuperado, y que cumple los objetivos de calidad previstos. Estos objetivos son específicos para cada lugar de recarga.

El cálculo requiere precisar la cantidad de agua nativa mezclada con el agua de recarga durante la operación, para lo cual es preciso emplear técnicas hidroquímicas y diagramas de cálculo específicos para el cálculo de la RE a partir de la concentración en determinados parámetros en el agua de recarga. La Fig. 1.29 esquematiza un ejemplo del proceso de recarga con un agua con concentración de Total de Sólidos Disueltos de 200 mg/l. Si el criterio cualitativo es de conseguir un agua de concentración inferior a 500 mg/l, la eficiencia de la recuperación será del 80 %.

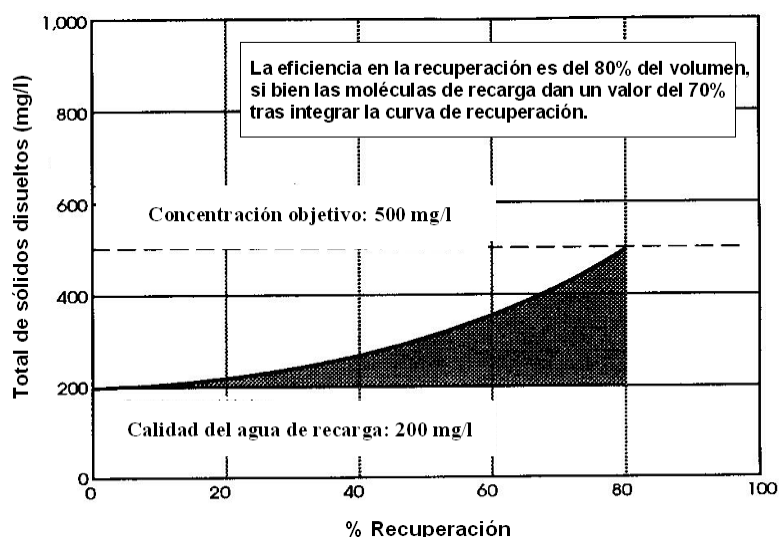


Fig. 1.29. Ejemplo de eficiencia en la recuperación en un dispositivo tipo ASR (modificado de Pyne, 1995).

3.1.2.8. Fases de un estudio de recarga de acuíferos

Para acometer un proyecto de recarga de acuíferos es preciso realizar un estudio de viabilidad y un estudio hidrogeológico previo al proyecto de obra (*ITGE, 1991*). El estudio debe contener, al menos, los siguientes puntos:

- 1) Estudio de previabilidad técnica, socioeconómica y política.
- 2) Estudio hidrogeológico: en él se ha de combinar y analizar los datos con la información previa y la generada durante el estudio relativa a la geología de la zona, hidrología, geomorfología, topografía, microtopografía, edafología, clima, usos del suelo y actuaciones humanas esencialmente (*MAPA, 1999a*). Con mayor grado de detalle:
 - Estudio de la litología. Elaboración de una cartografía geológica.
 - Determinación de la geometría del acuífero.
 - Campañas de prospección geofísica.
 - Estudio de la piezometría referida a un período determinado y elaboración de una cartografía hidrogeológica empleando las normas de la UNESCO.
 - Determinación de la velocidad de circulación, trazado de las equipotenciales y orientación de las líneas de flujo.
 - Estudios de hidroquímica y calidad en la zona saturada.
 - Preceptivamente se puede añadir un estudio de la ZNS.

Al tratarse de un parámetro de gestión, es preciso definir con suficiente precisión y antelación los parámetros básicos del acuífero, a fin de determinar los volúmenes implicados, el tiempo y la superficie de infiltración de acuerdo con los caudales disponibles, y obtener, en definitiva, toda la información necesaria para el estudio de la viabilidad técnica y económica del proyecto (*ITGE, 2000a; Silgado et al, 2002*).

Dependiendo del volumen previsto a recargar, es de obligado cumplimiento la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental. El contenido de un EsIA está legislado en la Ley 6/2001, de evaluación de impacto ambiental, artículo 6.

3.1.3. Recarga artificial y humedales

Dentro de los objetivos medioambientales de la recarga artificial, se plantea la recuperación de humedales degradados.

Se trata de una técnica novedosa, frente a otras aplicaciones de la técnica *AR* de mayor aceptación social (abastecimiento y regadío).

La documentación existente en los foros técnicos es escasa. En general, se trata de actuaciones colaterales a dispositivos de recarga, que emplean excedentes hídricos para la alimentación del humedal, o que derivan pequeñas cantidades de agua del circuito.

La interacción de las aguas subterráneas con humedales está gobernada por cuatro factores principales a tener en cuenta (*Domenico, 1972; Winter, 1998*):

- Posición de las masas de agua con respecto a los sistemas de flujo.
- Características del área de descarga “aguas abajo” según el gradiente de las equipotenciales.
- Características geológicas del sustrato.
- Climatología.

- **Posición de las masas de agua con respecto a los sistemas de flujo**

Los humedales dependientes del agua subterránea presentan distintas tipologías en cuanto a morfología y funcionamiento se refiere. Existen desde pequeños cuencos endorreicos a áreas alargadas de gran tamaño, humedales de agua dulce, salobre y salina si contienen salmueras y depósitos salinos.

Dependiendo de la posición relativa respecto a las líneas de flujo, aparecen en una gran variedad de circunstancias, tales como cerca de fondos valles, en interfluvios, en áreas bajas, en áreas costeras y a lo largo de la orilla de grandes lagos (*Custodio, 2001*). Una clasificación adicional clasifica los humedales por su geomorfología y relación con los cursos de agua superficiales (*García Rodríguez, 2003*).

De acuerdo con estos autores, se distinguen los siguientes tipos de humedales por su relación con las líneas de flujo de las aguas subterráneas y con la red de drenaje superficial respectivamente (Figs. 1.30 y 1.31).

La mayor parte de los humedales de la zona de estudio corresponden al cuarto tipo de acuerdo con la posición con respecto a las líneas de flujo de las aguas subterráneas, y bien son endorreicos puros con entrada de aguas subterráneas procedentes de flujos profundos o corresponden a las casuísticas 3, 4 y 5 con respecto a la red hidrológica superficial, con interposición de afloramientos en general impermeables entre la red de drenaje y el humedal.

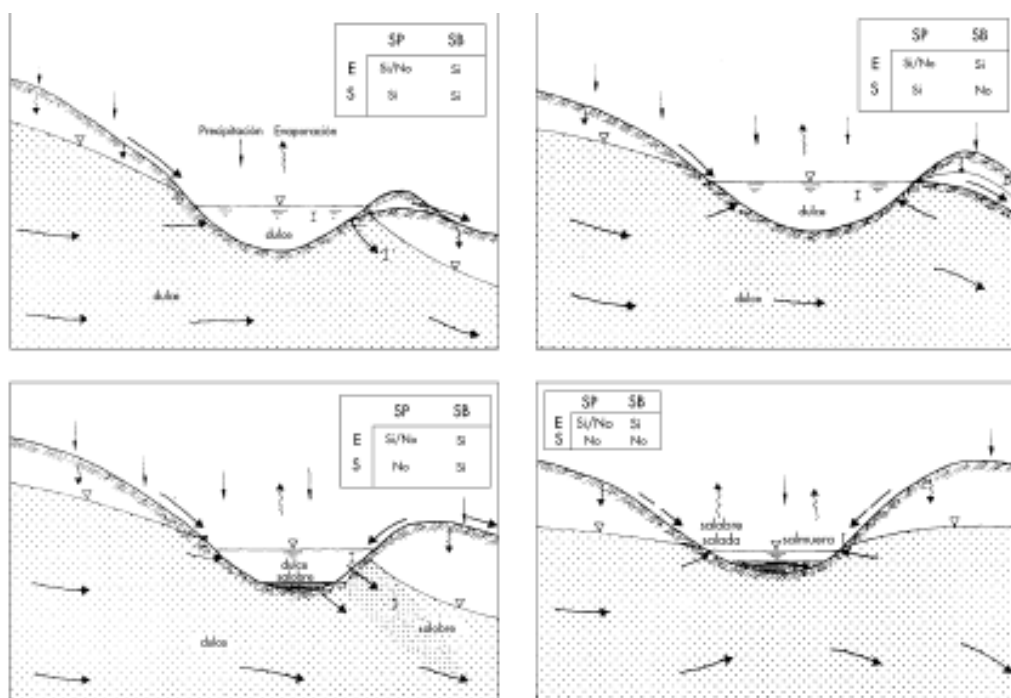


Fig. 1.30. Esquemas de los aportes de agua y salida a un humedal/laguna y efecto sobre el balance salino, suponiendo aportes de agua dulce. SP es el agua superficial, SB la subterránea, E la entrada y S la salida (tomado de Custodio, 2001).

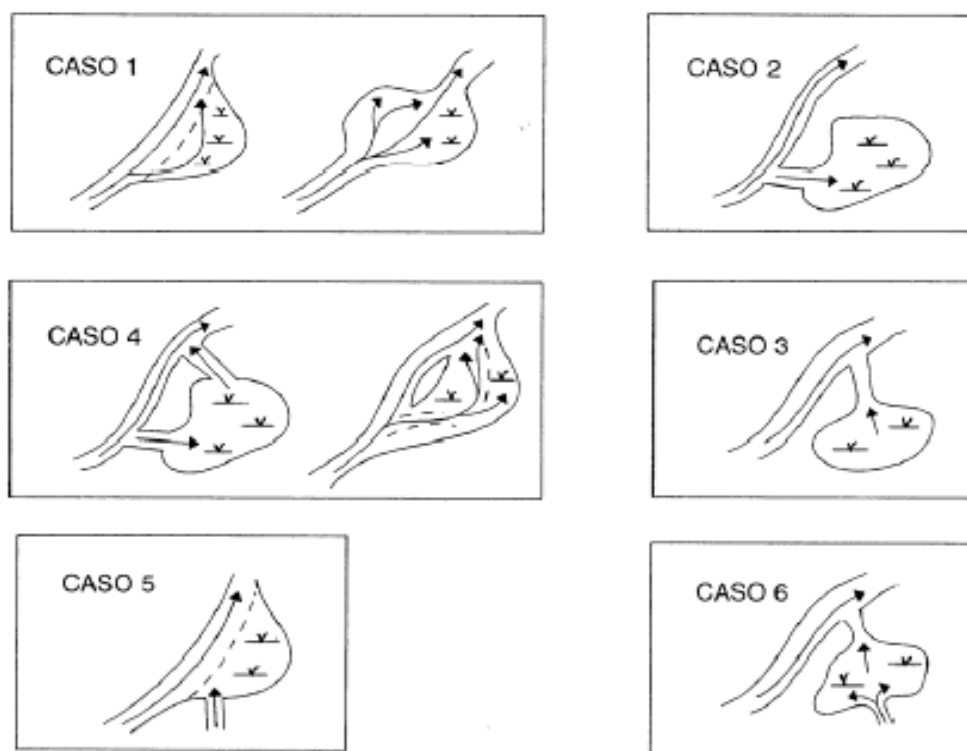


Fig. 1.31. Nueva clasificación de humedales de acuerdo con su relación hidrológica con los cursos de agua superficial y geomorfología (tomado de García Rodríguez, 2003).

- **Características del área de descarga de las líneas de flujo de las aguas subterráneas**

Los sistemas de flujo que conducen a la descarga pueden ser de tipo locales, intermedios o regionales (*Tóth, 1971, 1972, 1999; Custodio y Llamas, 1983*).

La descarga de las líneas de flujo subterráneas influye directamente en los balances de agua y de sales. La explotación de acuíferos, así como la recarga artificial, propicia variaciones en las condiciones hidrodinámicas, afectando a la distribución de la cantidad y calidad del agua subterránea que llega a los humedales. Si bien se trata de procesos lentos y diferidos (*Custodio, 2001*).

Los humedales de la zona de estudio en general son endorreicos, con alimentación procedente de flujos ascendentes profundos de largos períodos de residencia de las aguas subterráneas en el acuífero (*Tóth, 1963*), de ahí su elevada salinidad.

El resultado de la rotura de pendiente de las líneas de flujo ascendentes se manifiesta de varios modos: puede almacenarse en superficie, generando humedales y suelos salinos. En ocasiones la distribución areal de las masas de agua no es coincidente con la zona de rotura de pendiente (*Winter, 1999; Walker et al, 2002*).

- **Características geológicas del sustrato**

En muchas ocasiones se originan humedales artificiales, cuyo valor ecológico puede ser más o menos alto.

- **Climatología**

En cuanto a la climatología, la relación de los humedales con las aguas subterráneas está condicionado por la estacionalidad, evolucionando, en general, del siguiente modo:

- En primavera se producen las mayores descargas procedentes de flujos locales e intermedios.
- En verano, la infiltración dirigida hacia el cinturón de freatofitas circundante es máxima, originándose incluso transferencias entre humedales superficiales cercanos.
- En otoño e invierno, los flujos locales se superponen a los restantes y el sistema recupera su equilibrio hídrico (*Meyboom, 1966, 1967*).

De este modo, los humedales se comportan como cuerpos dinámicos.

En los bloques 4 y 5 se plantean alternativas para la recuperación del complejo de humedales de Coca-Olmedo, de probado valor ecológico y paisajístico, existentes al menos desde el período Terciario en la zona de estudio.

3.2. ALGUNAS EXPERIENCIAS DE AR EN EL MUNDO

Con objeto de contextualizar y presentar el grado de divulgación de esta “técnica especial”, a continuación se presentan y describen brevemente algunas de las principales actuaciones realizadas en España, Europa, especialmente de los dos países de mayor tradición en operaciones de AR: Holanda y Alemania (*LBAE, MIMAM, 2000b*), así como en dos países donde la hidrogeología es una carrera universitaria, no una especialidad: Estados Unidos y Australia.

Según el inventario de instalaciones que realiza Albert Tuinhof, del Instituto Acacia de Holanda, en coordinación con el Grupo de Recarga Artificial de la Asociación Internacional de hidrogeólogos (AIH), en 2004 hay casi 200 instalaciones operativas de ASR/MAR en el mundo (<http://www.iah.org/recharge>). Algunos de los países donde hay más sistemas operativos de ASR/MAR son Australia, Reino Unido, Canadá, Israel, Alemania, República Sudafricana, etc. Incluso en España existe una zona experimental que gestiona AGBAR en Barcelona (*Pérez-Paricio, 2001*). Existen además varios programas en desarrollo en Holanda, Nueva Zelanda, Tailandia, Taiwán, Kuwait, India, etc. (*Pyne, 1995 y 2003*).

3.2.1. Actuaciones en España

La extracción de aguas subterráneas en España es del orden de 5500-6500 hm³/año, lo que representa un 15-20 % del agua utilizada (*LBAE, MIMAM, 2000b*). De ellos son empleados entre 1.000 y 1.500 hm³/año para abastecimiento urbano, en torno al 25 % del agua total utilizada, mientras que los países limítrofes muestran porcentajes entre el 50 y 80 %.

Las aguas subterráneas presentan ventajas económicas, ambientales, de calidad y de garantía de suministro para abastecimientos públicos, ventajas reconocidas por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), que considera normal una utilización de aguas subterráneas para abastecimiento cercana al 75 % en países con potencial suficiente (*Llamas, 2001*).

En cuanto al regadío, en España aproximadamente se riega un 30 % de la superficie cultivada, lo que requiere un volumen inferior al 20 % del consumo hídrico total, debido a que es preciso emplear dotaciones menores que con aguas superficiales por la eficiencia del riego. A este respecto, conviene establecer parámetros de gestión hídrica, evaluando la eficiencia social y económica de los usos del agua, como fase previa para la asignación del recurso o el diseño del régimen económico-financiero.

En el V Congreso Nacional de Medio Ambiente, celebrado en Madrid en octubre de 2000, fue apuntado como objetivo medioambiental la “*Integración de aguas subterráneas en la gestión hídrica*.” Para ello se considera una estrategia “*el aumento de la capacidad de regulación de un sistema de explotación utilizando los acuíferos de modo similar a los embalses de superficie*.” De este modo “*es posible regular las escorrentías mediante operaciones de embalse (recarga artificial incluida), y desembalse (bombeos o surgencias naturales)*.” Por otro lado, son reguladas las “*reservas de renovación lenta, en estrategias de respuesta a sequías en que se planifica la reposición de las reservas vaciadas mediante*

recarga artificial o ralentización temporal de la explotación del acuífero, o como reservas disponibles una sola vez.”

El volumen anual medio de recursos hídricos resultantes de operaciones de AR en España oscila entre 50 y el intervalo de 300 a 350 hm³ según distintas fuentes, según fue comentado en el apartado introductorio.

En España los primeros antecedentes de recarga artificial datan, al menos, desde la época árabe, como son los *careos* alpujarreños o el sistema de diques y boqueras (Díaz-Marta, 1989; Cano-Manuel y González Ayestarán, 2000). Gran parte de estos dispositivos todavía funcionan en la actualidad en localidades como Mecina Bombarón, Busquistar, etc.

Las primeras instalaciones de recarga artificial que se construyeron en la época moderna (1969) están situadas en Cornellá y en los alrededores de Barcelona: aluvial del río Besós y del río Llobregat (Valdés, 1992; Martín-Alonso, 2003). En este último acuífero se recargan, en algunos años, hasta un máximo de 20 hm³ en pozos localizados en el delta, con aguas sobrantes de la planta de tratamiento de San Joan d’Espí. Esta recarga se complementa mediante escarificado del lecho del río Llobregat (Pérez-Paricio, 1999b).

Siguiendo un orden cronológico, es preciso apuntar que la segunda experiencia destacable realizada en nuestro país se ubica en Mallorca, en el Llano de Palma. Utiliza un sistema mixto fundamentado en el riego directo con aguas residuales domésticas e inyección de sobrantes, cuando existen, en pozos perforados en calcarenitas muy permeables. Actualmente están en funcionamiento dos sondeos de recarga (Murillo, 2002).

El Instituto Geológico y Minero de España, en colaboración con otros organismos, como el IRYDA, Gobierno Autónomo de la Rioja, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, BRGM (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*), Diputación de Alicante, etc., ha efectuado, desde 1984, una serie de experiencias piloto, entre las que cabe señalar (ITGE, 2000a, b, y d):

- Tres balsas de infiltración en el aluvial del Río Oja (La Rioja).
- Cinco balsas de infiltración en la vega de Guadix (Granada).
- Una balsa de infiltración tipo fosa en las calcarenitas de Carmona (Sevilla). El Aluvial del Guadalquivir y las Calcarenitas de Carmona constituyen una interesante formación almacén susceptible para la recarga artificial, al estar situadas en zonas donde no es posible construir embalses de superficie (Silgado et al, 2002).
- Dos zanjas de infiltración en el aluvial del bajo Guadalquivir, Lebrija (Sevilla) (García-Hernán, 1997).
- Un sondeo profundo y represas en el acuífero de Jijona (Alicante).
- Un sondeo profundo en el valle del Esgueva (Valladolid).
- Un sondeo profundo en Mancha Real (Jaén).
- Un pozo de gran diámetro dotado de galerías en la Plana de Gandía-Denia, sector Vergel-Els Poblets (Alicante).

- Dos pozos rellenos de grava en el aluvial del Guadalete (Cádiz).
- Seis balsas de infiltración en Mazagón (Huelva).
- Dos balsas de infiltración en las Dehesas de Guadix (Granada).

Las principales características de estas experiencias piloto figuran en varias publicaciones del IGME (*Murillo et al, 2001 y 2002; Murillo, 2002; De la Orden et al, 2003*).

Otras instituciones, como es el MAPA, a través de la Empresa de Transformación Agraria (TRAGSA), han promovido experiencias de recarga artificial de forma experimental. A este respecto cabe destacar la experiencia, ya citada, llevada a cabo en el invierno de 1997 en Ciudad Real, si bien no ha habido publicaciones al respecto por parte del organismo promotor (comunicación verbal).

En este mismo contexto cabe incluir las instalaciones de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (operativa desde noviembre de 2002) y del Carracillo (actualmente en fase de obras y experimentación) (*MAPA, 2003*).

Dos nuevas experiencias en etapa de experimentación son:

- Batería de pozos con drenes o galerías horizontales en profundidad aprovechando antiguas captaciones abandonadas o fuera de uso al objeto de disminuir costes con excedentes procedentes del río Girona (*Murillo et al, 2000*).

Recientemente se ha analizado la posibilidad de la recarga artificial con aguas residuales en el contexto hidrológico de la cuenca del río Onyar, Cuencas Internas de Cataluña (*Menció et al, 2003*); así como en el acuífero de la Moraña (Ávila), quedando rechazada esta última opción ante la falta de recursos hídricos superficiales excedentarios suficientes.

Los resultados obtenidos en todas las experiencias citadas anteriormente, donde los dispositivos de infiltración han funcionado a lo largo de uno o varios años con diferente duración del ciclo de recarga, son esperanzadores. En este sentido los distintos Planes Hidrológicos de cuenca han previsto diversas áreas en distintos acuíferos donde efectuar operaciones de recarga artificial, tarea que para su correcta realización precisa de la participación de las comunidades de usuarios de los acuíferos (*Murillo et al, 2001*).

La distribución geográfica de estas experiencias queda reflejada en la Fig. 1.32.

Un nuevo ejemplo relativo a la importancia creciente de las operaciones de AR en España se adjunta como Fig. 1.33.



Fig. 1.32. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en España. No han sido representados los experimentos escasamente divulgados, como las experiencias en la Cuenca del Guadiana.

Nota: La imagen de fondo de las figuras de este apartado ha sido tomada de internet:

http://www.earthetc.com/ecweath/asps/ecweath_frame.asp?Image=geodetic/world/landsat742

Encargan a la UJI otro estudio sobre recarga artificial de los acuíferos

C.A.D.

CASTELLÓN.— El estudio de la situación hídrica de la provincia de Castellón que lleva a cabo la Mesa del Agua contará con un nuevo trabajo científico de referencia.

El presidente de la Diputación de Castellón, Carlos Fabra, firmó ayer un convenio de colaboración con el rector de la Universitat Jaume I, Francisco Toledo, y con el presidente del Consejo de Participación Social de esta universidad, Rafael Benavent, para la financiación del estudio de recarga artificial de acuíferos de la provincia de Castellón en el que trabaja el grupo de investigación del departamento de Ciencias Experimentales de la UJI, que dirige el profesor Ignacio Morell.

La realización de este estudio es un nuevo encargo que la Mesa del Agua, convocada por la Diputación Provincial y en la que están representados los colectivos sociales implicados en la gestión hídrica de la provincia, ha realizado a la institución provincial.

Este trabajo supone la segunda fase de un estudio más amplio que viene realizando el departamento que dirige el profesor Morell y cuyas conclusiones de la primera fase ya se han expuesto en el marco de la Mesa del Agua. En esta segunda fase, se prestará especial atención al estudio de la recarga artificial de acuíferos en la comarca de la Plana, que es la zona de la provincia que sufre mayores problemas.

Fig. 1.33. Recorte de prensa del periódico Levante de Castellón de fecha 23/03/2001. La recarga artificial de acuíferos presenta un grado de divulgación diferencial en el Estado español. Mientras en el oeste, aparentemente, es menos conocida, el grado de entendimiento es mayor en el arco mediterráneo.



3.2.2. Algunas experiencias en Europa

Con objeto de situar el grado de utilización de la AR y ASR, se citan algunas de las experiencias llevadas a cabo en Europa. En los siguientes epígrafes nos referiremos al resto del mundo.

El inventario no pretende ser exhaustivo al escapar de los objetivos inicialmente planteados. Este objetivo será prontamente desarrollado por Albert Tuinhof, del Instituto Acacia de Holanda, en coordinación con el Grupo de Recarga Artificial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), quien está realizando un inventario exhaustivo de las instalaciones de AR/ASR en todo el mundo, y que pretende terminar y difundir en el año 2004 (<http://www.iah.org/recharge>).

No obstante, el apartado puede servir para tomar conciencia de la importancia que ha adquirido la técnica de gestión de recarga de acuíferos o *Management on Artificial Recharge* (MAR) a escala mundial, y como un primer paso dentro de los programas de divulgación y educación ambiental.

En Europa se han ensayado distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Dusseldorf (Alemania) y desde 1879 en Nigmejen (Holanda). Desde entonces se han practicado diferentes alternativas, caracterizadas por la carencia de un protocolo común europeo, carencia que persiste en la actualidad.

Las aguas de recarga derivadas de algún río representan un 50% en Eslovaquia, un 45% del abastecimiento en Hungría, un 16% en Alemania, un 5% en Holanda, etc.

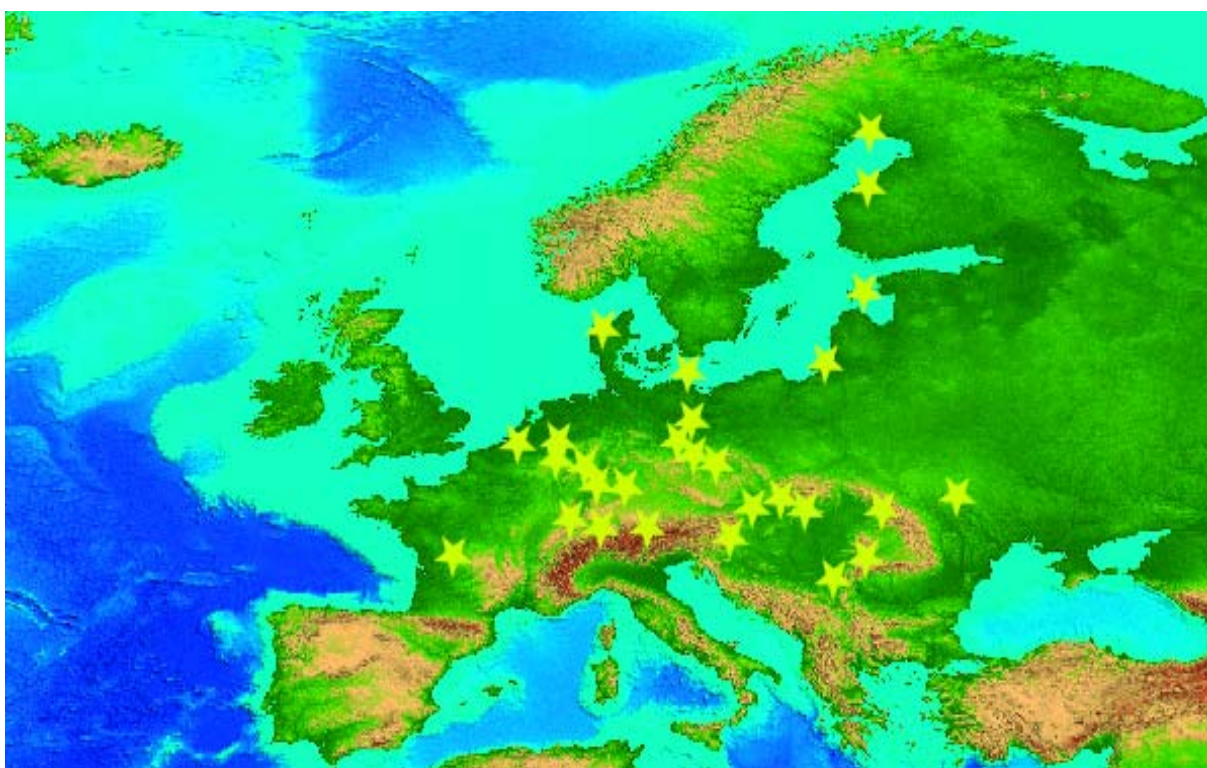
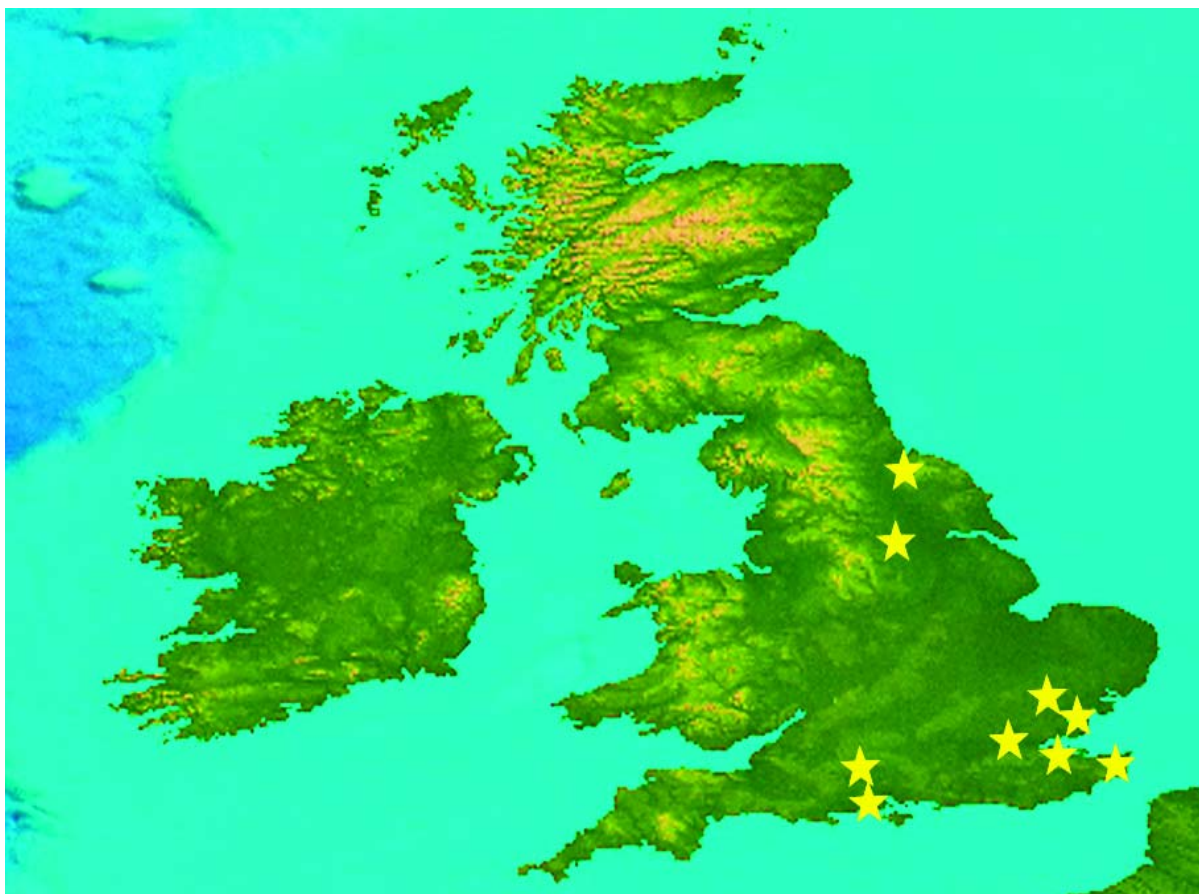
La ciudad de Dusseldorf depende en un 100% de las aguas de AR, así como Budapest. Berlín en un 75%, etc.

Además de las estructuras de AR y ASR, hay un amplio desarrollo de RBF o Bancos de Filtración en Europa. La mayor densidad se sitúa junto al cauce de los ríos Rhin, Elba, Danubio y en el lago Tegel (*Grischek et al, 2002b*). Existen varias plantas de RBF en ciudades como Colonia, Ginebra, Dresden, Zurich, Lindau, Kuopio y Maribor.

Algunas de las experiencias europeas más relevantes en MAR, ASR y RBF se citan a continuación, con mención de la fuente para el lector interesado. La ubicación de las mismas se presenta en las Figs. 1.34 y 1.35 para el Reino Unido y Europa (excluida la Península Ibérica en la representación).

- Alemania: Dresden-Tolkewitz, Meissen-Siebeneichen, Torgau, Flehe, Dusseldorf, Auf den Grind, Berlín-Tegel, Berlín-Friedrichshagen (*Grischek et al, 2002*).
- Austria: Ulfiswiese, Innsbruck, Donauinsel y Viena (*Grischek et al, 2002*).
- Dinamarca (*Madsen et al, 1998*).
- Eslovaquia: Rusovce, Kalinkovo, Samorin, Gabčíkovo (*Grischek et al, 2002*).
- Eslovenia: Maribor (*Grischek et al, 2002*).

- Finlandia: Hietasalo, Kuopio, Riku, Kangasala (*Grischek et al, 2002b; Miettinen et al, 2003*).
- Francia: Capdenac-Gare, Geneuille (*Grischek et al, 2002*); París (*Haeffner et al, 1998*).
- Holanda: Nijmegen, Roosteren (*Grischek et al, 2002; Van Bremen & Walls, 2002*).
- Hungría (*Laszlo, 2003*); Budapest, isla de Csepel, Szentendre, Esztergom, Koppanymonostor, Nagybajcs-Szogye, Gyor (*Grischek et al, 2002b*).
- Lituania: Baltezers y Riga (*Grischek et al, 2002*).
- Noruega (*Sandlund & Viken, 1997*).
- Reino Unido: Fochabers, Gatehampton y Essex (*Montgomery, 1987; Cook & Moncaster, 1998 y Grischek et al, 2002b*).
- República Checa: Karany (*Grischek et al, 2002b*).
- Rumanía: Gheraiesti, Bacau (*Grischek et al, 2002b*).
- Rusia: Kaliningrado (*Grischek et al, 2002b*).
- Suiza: Ginebra , Linsental, Winterthur, Zurcí, Ginebra (*De los Cobos, 2002*).
- Yugoslavia: Kraljevo (*Grischek et al, 2002b*).



Figs. 1.34 y 1.35. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en Inglaterra; y en Europa (excluidas España e Inglaterra) (Modificado de Grischek et al, 2002b).

3.2.3. Algunas experiencias en América

Según el inventario de instalaciones del Instituto Acacia de Holanda, al menos hay 56 instalaciones operativas de ASR/MAR en USA (<http://www.iah.org/recharge>).

En la Fig. 1.36 se presenta la ubicación de los principales dispositivos conocidos.

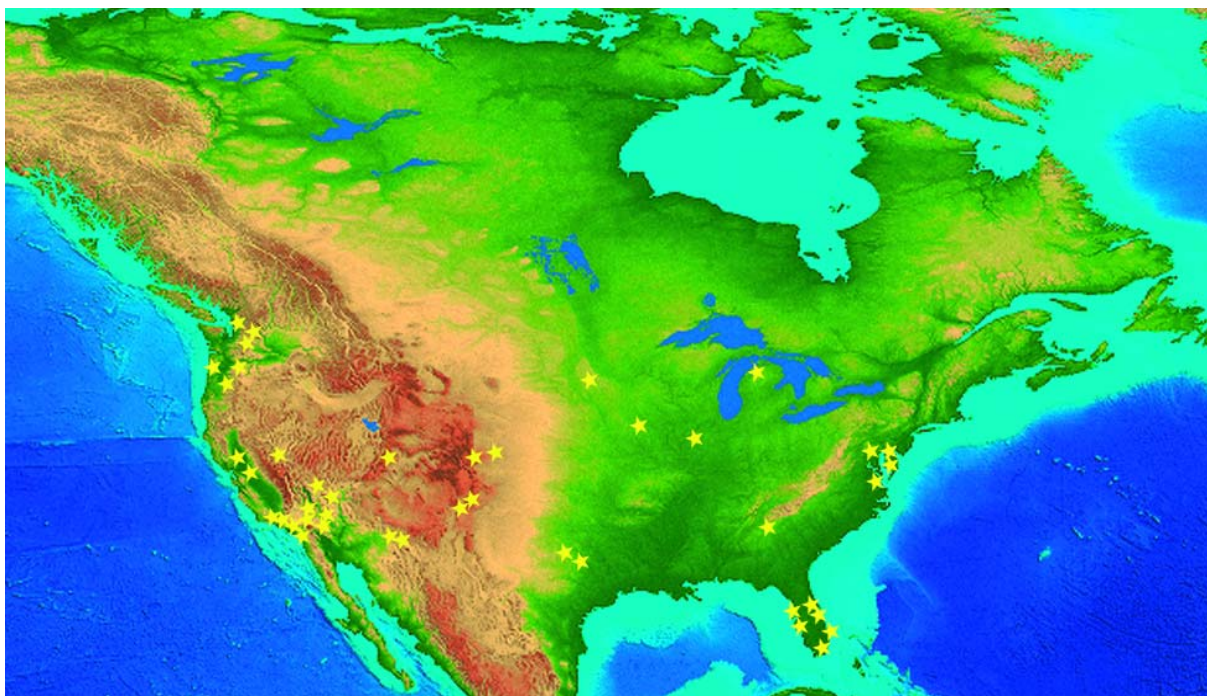


Fig. 1.36. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en USA.

Se han hallado referencias de actividades de MAR, además de en América del Norte en México y Argentina (Tuinhof et al, 2004).

3.2.4. Algunas experiencias en África y Oriente Medio

Las experiencias más extendidas han sido llevadas a cabo en Israel, República Surafricana y Namibia.

Los estudios preliminares llevados a cabo por el CSIR, el Departamento de “*Water Affairs and Forestry*” y los Ayuntamientos de Windhoek (Namibia), Calvinia, Kharkams (Cabo del Norte) y Petersburgo (República Surafricana) han concluido en que la recarga artificial puede representar una solución efectiva para países propensos a las sequías a bajo coste (<http://www.csir.co.za>, 2002).

En Israel existen dos proyectos que aprovechan aguas de inundaciones para recargar los acuíferos de Shiquma, al norte de la franja de Gaza, y de Nahalei Menashe, cerca de Cesarea (Acreman, 2000).

El primero consta de una presa que retiene las aguas de inundación, para más tarde distribuir las hacia estanques de infiltración intercalados en dunas arenosas en la costa. Presenta problemas de colmatación importantes y altos costes de bombeo.

El segundo consta de un embalse de almacenamiento, uno de decantación y una serie de estanques de infiltración. La conducción del agua se produce por gravedad. Las Figs. 1.37 y 1.38 muestran el aspecto y posición de estos dispositivos.



Fig. 1.37. Estructuras de MAR en Israel (tomado de Acreman, 2000).

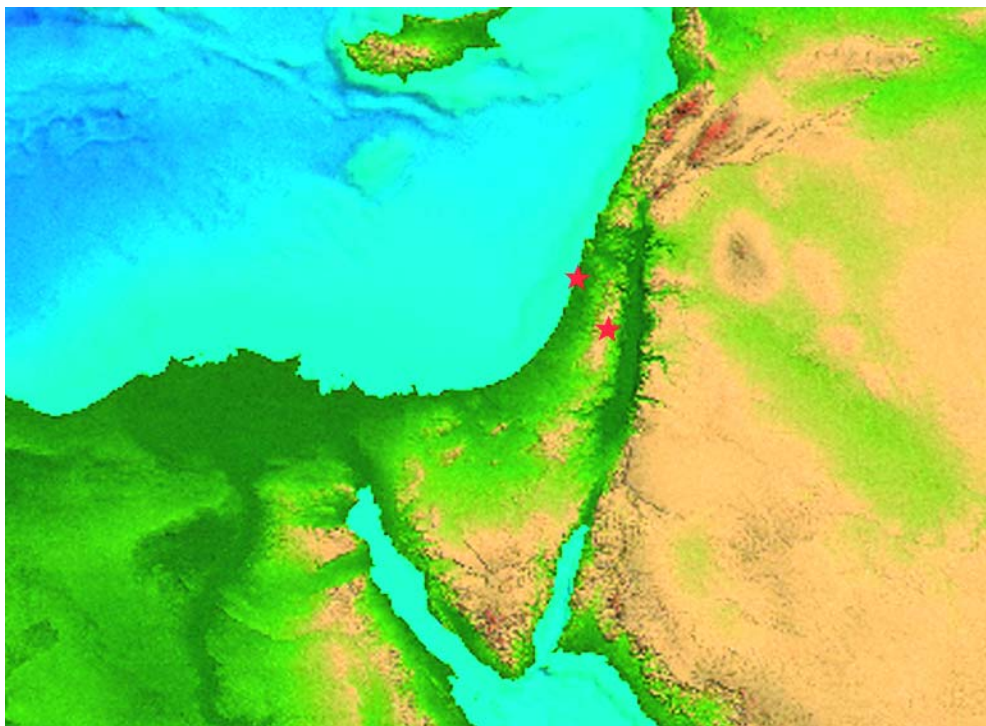


Fig. 1.38. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en Israel.

Nuevas experiencias de MAR se han llevado a cabo empleando embalses subsuperficiales, embalses arenosos de recarga, tanques de precolación y gabiones en Egipto, Kenia y Namibia (Tuinhof *et al*, 2004).

3.2.5. Algunas experiencias en Asia

Algunas de las experiencias más destacables son la desarrolladas en Tailandia, Taiwán, Kuwait y la Unión India, donde hay catalogadas al menos 10 experiencias en recarga artificial en Delhi, Chandigarh, New Delhi, Haryana, Punjab, Himachal Pradesh, Palampur (Kangra), Indore (Madhya Pradesh), Jaipur (Rajasthan), etc. (www.cgwaindia.com).

A pesar de las reiteradas peticiones a instituciones de la Unión India para ampliar esta información, hasta la fecha no se han recibido noticias adicionales.

3.2.6. Algunas experiencias en Oceanía

En Australia y Nueva Zelanda se ha desarrollado la técnica de ASR/MAR con gran efectividad. En la actualidad existen al menos cinco programas en desarrollo comandados por CSIRO y CGS (Pavelic, 2003, en www.iah.org/recharge) posicionados en la Fig. 1.39.

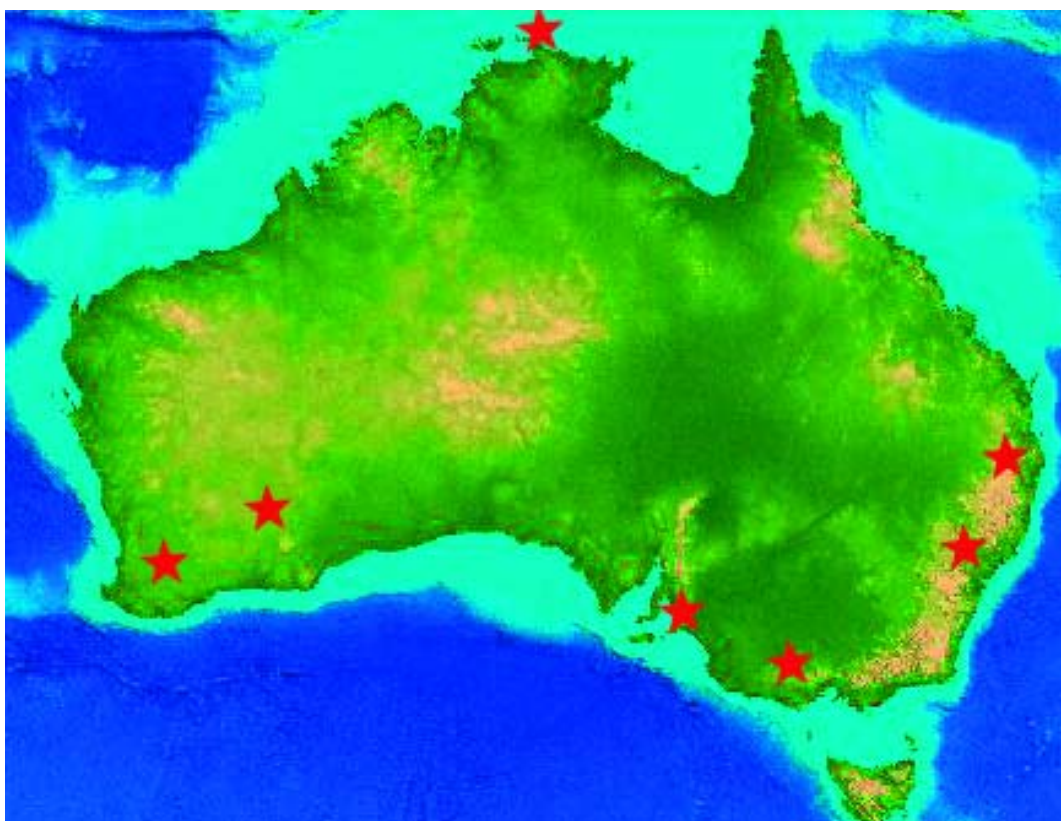


Fig. 1.39. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos o en proyecto en Australia.

3.3. LA COLMATACIÓN

Como rasgo común de todas las instalaciones presentadas y de todos los antecedentes consultados, conviene destacar que la colmatación representa el principal problema técnico hallado a la hora de acometer proyectos de recarga artificial en todo el mundo.

Se trata de un proceso complejo cuyo conocimiento requiere el trabajo de equipos interdisciplinares y experiencias *in situ* y laboratorio de primer orden.

Tal es la importancia del proceso, que se considera procedente presentar el estado del conocimiento en la materia, no sin antes anticipar que se trata de un impacto que debe ser combatido mediante políticas preventivas y curativas, como son las técnicas SAT (Soil Aquifer Treatment), ya introducidas al comienzo de este Bloque y ampliamente consideradas en el Bloque 5 del presente estudio.

La cuantificación de la colmatación puede y debe constituir, por sí misma, un indicador medioambiental de primer orden en las operaciones de recarga artificial tanto superficial como profunda. Los índices cuánticos son numerosos en la literatura de recarga artificial. En el Bloque 5 se propone un indicador medioambiental de respuesta específico para la zona de estudio y extrapolable a situaciones análogas, basado en el estudio del acuífero durante y después de las operaciones de recarga artificial.

3.3.1. Problemas de colmatación

La colmatación representa el principal problema en las estructuras de recarga artificial, tanto superficiales como profundas, al minimizar de forma drástica la capacidad de infiltración de medios porosos en períodos de tiempo cortos, como resultado de procesos físicos, químicos y biológicos (*Olsthoorn, 1982; Custodio, 1986; Pérez-Paricio, 2000a*).

En este apartado, y como preámbulo a la adopción de un indicador de respuesta y al diseño de estructuras idóneas para la recarga artificial, se esboza brevemente el estado de la cuestión, en cuanto a problemas de colmatación se refiere.

El entendimiento del problema es complejo. A este respecto, destacan los trabajos de *Pérez Paricio, 1998a y 2000a*, que aborda el tema de la colmatación desde un punto de vista matemático y físico, generando un modelo predictivo.

La colmatación generalmente está motivada por la interacción e interdependencia de varios mecanismos que con frecuencia son difíciles de distinguir (*Frycklund, 1998; Rinck-Pfeiffer et al, 2000*). Los principales mecanismos, de cara a su conceptualización son (*Pérez-Paricio y Carrera, 1999a*):

- Colmatación física por partículas en suspensión, generalmente en el agua de recarga o generadas en el seno del acuífero por fuerzas hidrodinámicas o hidroquímicas (*Pavelic et al, 1998*).
- Biocolmatación bacteriana por acumulación de microbios o productos extracelulares.

- Colmatación química por disolución y precipitación de minerales, con frecuencia catalizados por microbios o algas al extraer CO₂ disuelto en su actividad fotosintética (Bouwer, 2002).
- Generación de gas y entrapamiento en el acuífero (Olsthoorn, 1982). Puede ser por procesos físicos, tales como la caída de la presión, aumentos súbitos de la temperatura, generación de gas por reacciones bacterianas o de burbujas por caída libre de agua, incluso por diseños inapropiados de la estructura de recarga con el ulterior entrapamiento del aire por presiones negativas [efecto conocido como “Lisse” (Krul & Liefvrick, 1946)].
- Compactación o compresión de la capa superficial del caz de recarga (Bouwer & Rice, 1989; Custodio, 1983).

3.3.1.1. Colmatación física

La colmatación física se traduce en la disminución de la porosidad mediante la distribución en el medio receptor de partículas coloidales, intermedias o largas (Pérez Paricio, 2000a).

La delimitación de estas categorías de acuerdo con su tamaño no está bien acotada, si bien se pueden considerar coloides a las partículas de tamaño cercano a 1 µm; intermedias entre 1 y 30 µm; y grandes, a las mayores de 30 µm. Las primeras intervienen en reacciones de complejación, intercambio iónico y en la absorción de radionucleidos y metales (Ryan & Elimelech, 1996). Las segundas actúan principalmente por fuerzas electrocinéticas o de Van der Waals (Mintz, 1964); y las mayores intervienen en la sedimentación, intercepción y efectos hidrodinámicos.

En la Fig. 1.40 quedan sintetizados los distintos tipos de partículas y filtros que intervienen en la colmatación física. En el eje de ordenadas figura el intervalo de tamaño de cada tipología de proceso colmatante.

Los tipos de acumulación pueden ser (Fig. 1.41):

- Por bloqueo: las partículas obstruyen los poros por intercepción, disminuyendo la capacidad de infiltración.
- Generación de un *cake* sin compresión: una costra de colmatación se origina en superficie por efecto de la retención previa de partículas bloqueadas. Es la tipología específica de instalaciones de recarga artificial superficial.
- Generación de un *cake* con compresión, en caso de compactación del sedimento ocasionado por la acumulación de partículas.
- Filtración profunda. Las partículas más pequeñas penetran en el acuífero y migran una cierta distancia hasta que se inmovilizan, generalmente entrapadas en una posición del acuífero por impedimentos físicos. Es típica de pozos de inyección y de sistemas superficiales.

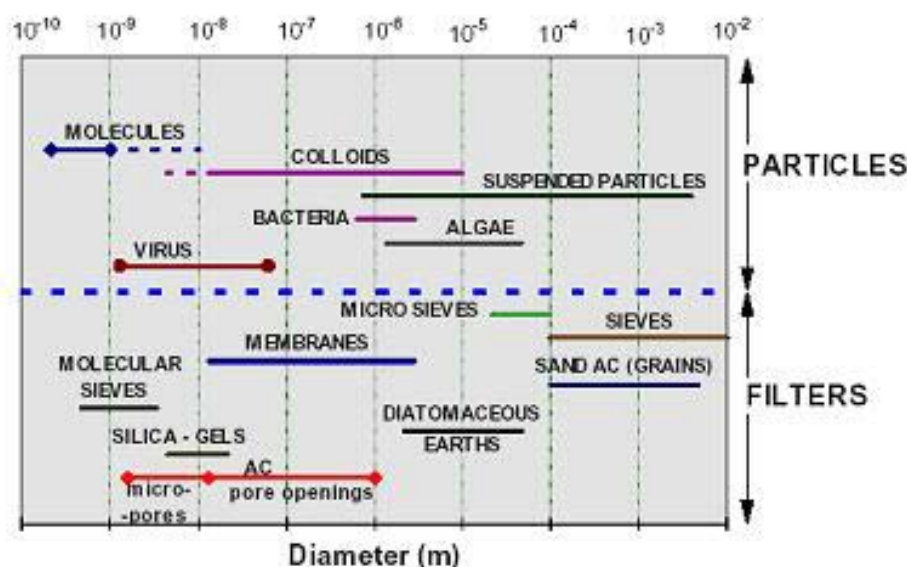


Fig. 1.40. Clasificación de las partículas y filtros por su tamaño. Tomado de Pérez-Paricio, 2000a.

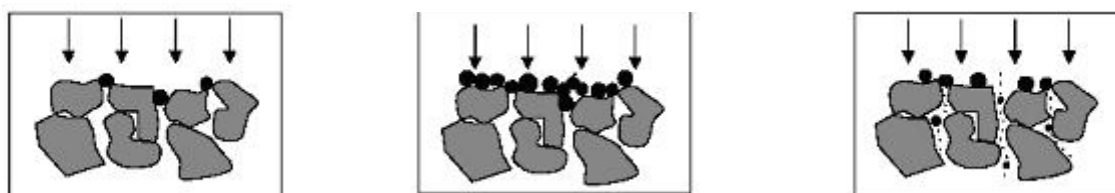


Fig. 1.41. Mecanismos durante la filtración del agua. En principio (izquierda) las partículas mayores que los poros quedan bloqueadas; durante la filtración son movilizadas y retenidas (en medio) y, en caso de movilización de las partículas, se distribuyen por el acuífero de acuerdo con su granulometría, haya o no compresión superficial (derecha). Tomado de Pérez-Paricio, 2000a.

La prevalencia de un tipo de mecanismo sobre otro depende de varios factores, entre los que cabe destacar la granulometría del medio receptor, la calidad de las aguas de recarga, tipo de sedimentos y superficie de infiltración, así como del caudal de recarga.

Su medida se lleva a cabo mediante parámetros artificiales de cuantificación, como es el MFI [índice de fallo en membrana, “Modified Fouling Index” (Schippers & Verdouw, 1980)], AOC [Carbono Orgánico Asimilable (Hijnen & van der Kooij, 1992)], BFR [Velocidad de Generación de Biofilm o “Biofilm formation rate” (van der Kooij, 1995)], BFT [Test de Paso del Filtro o “Bypass filter test” (Pyne, 1995)], etc.

Estos índices pueden ser utilizados como indicadores medioambientales (Schippers *et al*, 1995), y, por su tipología [dentro del sistema de indicadores PER (presión, estado y respuesta)], podrían ser clasificados como “de respuesta”, ya que permiten cuantificar la efectividad de la recarga artificial de acuerdo con el grado de colmatación, en caso de haberse diseñado y aplicado actividades de mantenimiento y descolmatación (en caso contrario podrían ser calificados de presión).

La descripción de los distintos tipos de indicadores del grado de colmatación se presenta a continuación, si bien, su aplicación ha sido postergada para el Bloque 4, dentro del diseño de un indicador específico.

3.3.1.1.1. Indicadores del grado de colmatación

Se ha realizado un estudio de los índices de colmatación ya diseñados disponibles en la literatura hidrogeológica específica, que son:

- **Índice de taponamiento**

Originariamente este índice fue desarrollado en Holanda para cuantificar el potencial de las aguas para ser tratadas a su paso por membrana durante el proceso de ósmosis inversa (Pyne, 1995).

Su fundamento teórico básico está basado en asumir que un filtro que resulta taponado a una presión determinada y constante puede definir un “índice de taponamiento” para un agua específica a una temperatura determinada.

- **MFI. Índice de Fallo en Membrana**

Conocidos los mecanismos que condicionan la colmatación, tales como granulometría del acuífero, calidad de las aguas de recarga, naturaleza de los sedimentos, superficie de infiltración y caudal/velocidad de recarga, fue diseñada una ecuación genérica para describir el grado de actuación de ellos (Orr, 1977). Esta ecuación fue modificada posteriormente, teniendo en cuenta la superficie de filtración y la relación dependiente inversa entre el volumen filtrado y la inversa de la velocidad de flujo (Schippers & Verdouw, 1980). La pendiente de este término es descrito como “modified fouling index”, índice de suciedad modificado o índice de fallo en membrana (MFI), cuya expresión es:

$$\frac{d^2V}{dt^2} = \alpha_1 \left(\frac{dV}{dt} \right)^{\alpha_2}$$

Donde:

- T: tiempo de recarga
- V: volumen recargado [L³]
- α_1 : coeficiente dependiente del sistema de recarga.
- α_2 : constante dependiente del mecanismo de filtración.

Si $\alpha_2=0$, la ecuación describe el mecanismo de filtración a través del cake superficial. La integración de la ecuación queda como sigue:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_1 R_0}{\Delta P A_F} + \frac{\mu_1 I_F}{2 \Delta P A_F^2} V$$

Donde:

- μ_1 : viscosidad dinámica del líquido [ML⁻¹T⁻¹]
- R_0 : resistividad inicial del filtro limpio [L⁻¹]
- A_F : superficie de filtración en membrana [L²]
- I_F : medida de la suciedad de la membrana [L⁻²]



- P: presión [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$], dependiente del diseño de la estructura.

Físicamente representa la pendiente de la curva inversa infiltración/volumen filtrado acumulado. La pendiente de este término es el MFI. Su expresión queda como sigue:

$$\text{MFI} = \frac{\mu_1 I_F}{2 \Delta P A_F^2}$$

Su determinación se realiza por un simple cálculo a partir de medidas realizadas en membrana y en la zona de recarga.

- **Calculo del MFI para la Cubeta de Santiuste**

Se ha realizado un cálculo del MFI para la Cubeta de Santiuste. El valor resultante, medido con posterioridad al primer año de operatividad de las estructuras de recarga (octubre de 2003), adoptando unos valores para los parámetros que no han podido ser medidos en campo similares a los resultantes en los campos de dunas de Amsterdam (*en Schippers & Verdouw, 1980*), es **de 25 a 30 s/l²** unidades MFI, valor que puede ser considerado "de tanteo" al carecer de datos específicos para su determinación y por ser un índice cuya fiabilidad está vinculada a su cálculo plurianual.

Los valores bibliográficos determinados para los dispositivos operativos en Ámsterdam oscilan entre 10 y 35 s/l², aumentando en verano por la actividad biológica. El paso por un filtro de arena reduce el MFI de 2 a 5 s/l². (*Van Duijvenbode & Olsthoorn, 2002*)

El valor umbral empleado en Holanda para acuíferos arenosos finos (sistemas dunares) es de 3 a 5 s/l².

Este índice puede ser considerado un indicador de respuesta para cuantificar la efectividad de la recarga artificial de acuerdo con el grado de colmatación y para planificar actividades de mantenimiento y descolmatación, si bien cuenta con ciertas limitaciones:

- Es específico para procesos colmatativos físicos.
- Los valores para el umbral deben ser establecidos tras estudios de campo plurianuales.

• **Carbono orgánico asimilable (AOC)**

Otro indicador empleado en sistemas de AR holandeses es el AOC o carbono orgánico asimilable (*Hijnen & van der Kooij, 1992*). Representa la fracción de carbono orgánico, generalmente en forma de colonias de bacterias del tipo *Pseudomonas fluorescence*, que puede ser asimilado por los microorganismos con rapidez en los dispositivos de recarga. Su problema es la determinación en campo, ya que requiere técnicas analíticas importantes.

Su concentración en las aguas de recarga debe ser inferior a 10 µg/l si no se usan desinfectantes en el pretratamiento previo (*Bouwer, 2002*).

- **Velocidad de generación de biofilm (BFR)**

Un tercer indicador es el BFR, velocidad de generación de biofilm o “*Biofilm formation rate*” (van der Kooij, 1995). Se emplea para la medida de la biomasa presente en el agua de recarga y del potencial de colmatación biológica, si bien el indicador tiene una ligera consideración por la colmatación física.

- **Test de paso del filtro (BFT)**

Otro indicador adicional es el Test de paso del filtro o “*Bypass filter test*.” El indicador es determinado en el punto de entrada de agua de recarga al sistema. Se suele determinar por una cuantificación de la cantidad de sólidos disueltos en un periodo de tiempo preestablecido (desde unas horas a una semana). El agua es filtrada por un filtro de poliéster de 5 µm y 25 cm de longitud a una presión de 5 a 30 psi. En situaciones específicas, el filtro puede ser sustituido por un turbidímetro (Pyne, 1995).

Según experiencias empíricas, estos indicadores sirven para evaluar el potencial de colmatación en distintas aguas, pero no pueden ser empleados para predecir el grado de colmatación y volumen de inyección en pozos en uso (Bouwer, 2002).

A la vista de los indicadores empleados disponibles en la bibliografía, se aprecia que la mayoría de ellos cuentan con un sistema de filtración del agua de recarga. Este dispositivo no ha sido implantado en el sistema hasta la fecha, dada la idoneidad cualitativa de las aguas del río Voltoya, al proceder de un área fuente granítica, con escaso periodo de circulación y en general muy baja turbidez, salvo en situaciones excepcionales.

Las condiciones específicas en que se desarrolla la actividad y el diseño del dispositivo de recarga han generado la necesidad de elaborar un indicador específico, bien sea de respuesta o de presión [de acuerdo con el sistema de indicadores ambientales PER, (Friends & Raport, 1979) descrito en el Bloque 4], para estudiar la evolución del grado de colmatación en el tiempo y poder actuar sobre las aguas de recarga/medio receptor mediante técnicas SAT. Este indicador está basado en la medición de variaciones relativas del porcentaje de finos en puntos determinados del dispositivo de recarga artificial, medidos en intervalos periódicos. La explicación del indicador queda postergada para el Bloque 4, donde es aplicado.

3.3.1.2. Colmatación biológica (bioclogging)

Los mecanismos de colmatación biológica han sido identificados y descritos por Babeye et al, 1998 (en Pérez-Paricio, 2000a). Estos son:

- Acumulación de celdas en los poros del acuífero.
- Producción de polímeros extracelulares, básicamente polisacáridos.
- Entrampamiento de gases, en especial CO₂ por respiración, N₂ por desnitrificación, y metano por metanogénesis.

- Acumulación de precipitados insolubles.

Las bacterias funcionan como catalizadores en las reacciones redox, dependiendo de la disponibilidad de oxígeno para el crecimiento bacteriano.

La mayoría de las bacterias se encuentran unidas a la superficie de partículas del acuífero (Pyne, 1995). Su presencia en las aguas subterráneas oscila normalmente entre 100 y 200.000 celdas por mililitro, alcanzando en ocasiones el millón (Dragun, 1988).

El potencial de generación de bacterias mayor se da en condiciones ambientales con una temperatura entre 20 y 40°C, pH entre 7.8 y 8.6, total de fósforo, nitratos y hierro por encima de 1 mg/l, carbono orgánico disuelto por encima de 5 mg/l y oxígeno disuelto por encima de 3 mg/l. Algunos de estos parámetros se muestran más correlacionados de forma asociada que aisladamente para la generación de carga biológica (Pyne, 1995). Por ejemplo, la presencia de nitrógeno, fósforo, pH y temperatura están correlacionados con la presencia de procesos colmatantes biológicos.

Además de las bacterias, otros organismos intervienen activamente en la colmatación biológica y química. Por ejemplo, la precipitación de carbonatos, especialmente calcita, es originada por la fotosíntesis de las algas, conduciendo a la sobresaturación en ciertas fases minerales.

En la Fig. 1.42 se presentan los principales factores que condicionan el crecimiento de microorganismos en las estructuras de recarga.

3.3.1.3. Colmatación química

Las reacciones químicas entre el agua de recarga y las aguas subterráneas pueden producir la precipitación de fases minerales, con la consiguiente pérdida de porosidad (LLuria et al, 1991; Huisman & Olsthoorn, 1983; Peters et al, 1999). Este efecto se produce especialmente en zonas de cohabitabilidad de ambos tipos de aguas, descendiendo cuando las aguas subterráneas son desplazadas por las aguas de recarga, en cuyo caso, los procesos se limitan a los de interacción aguas de recarga-suelo.

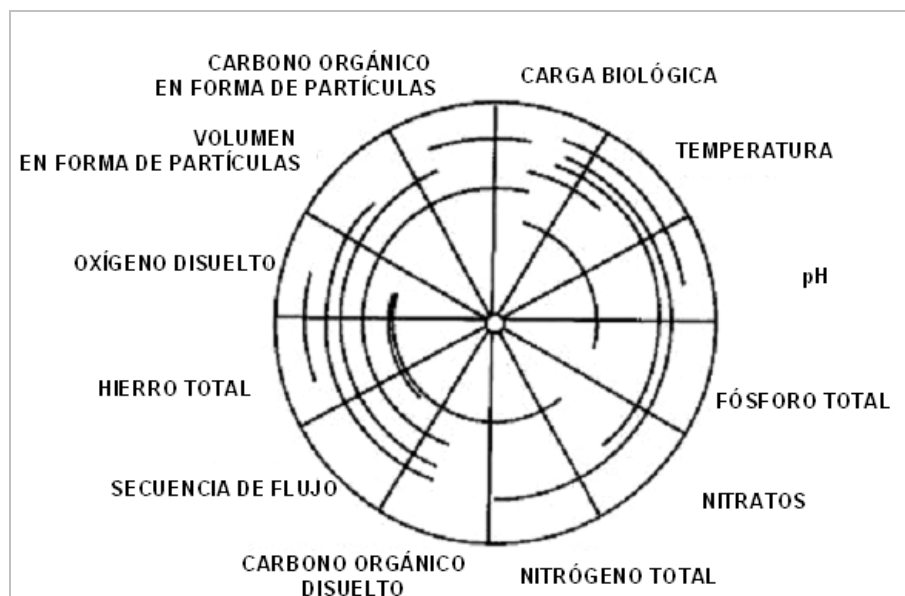


Fig. 1.42. Factores que afectan el crecimiento de microorganismos y taponamiento del pozo de recarga (modificado de Van Beek, 1986).

Los procesos de *disolución-precipitación* están gobernados a su vez por las condiciones termodinámicas específicas. Por ejemplo, en los perfiles hidroquímicos realizados a lo largo del caz de recarga se ha detectado que la disolución de hierro en condiciones reductoras viene seguida por procesos oxidantes con precipitación de hierro. Estas reacciones aparentemente se encuentran catalizadas por bacterias, concidiendo con las observaciones de Stuyfzand (*en Stuyfzand, 1993*). Este aspecto se discute en el Bloque 3 con más detalle.

Otro efecto importante que conlleva colmatación química es el originado por procesos de interacción entre fases gaseosas y el quimismo de las aguas. Por ejemplo, aportes extras de oxígeno aceleran la precipitación de hierro, pérdidas de CO_2 aceleran la precipitación de carbonatos (*Theiss & Singer, 1974*), así como lo hace el oxígeno con los precipitados férricos (*Custodio y LLamas, 1983*).

3.3.1.4. Generación de gases

El principal volumen de gas asociado a procesos de colmatación se genera por reacciones bioquímicas. El agua adquiere una presión de gases disueltos, que disminuye con los descensos de presión y temperatura, liberándose en forma de burbujas, tanto en las tuberías de conducción como en el seno del acuífero, donde incrementan la resistencia a la filtración.

Este fenómeno es conocido como “*efecto Lisse*”, al haber sido descubierto en la ciudad holandesa del mismo nombre (*Krul & Liefrinck, 1946*).

La entrada de agua de recarga, ligeramente más caliente que el acuífero, produce la liberación del aire disuelto, el cual, en su migración, queda entrampado en el acuífero, reduciendo la permeabilidad de éste, y, consecuentemente, su capacidad de infiltración. También se libera aire al descender la presión parcial del agua de recarga artificial.

En pozos de inyección el proceso es denominado “aire atascado” o “*air binding*” (Pyne, 1995).

El hecho de que un proceso de recarga superficial se inicie a través de un nivel sin colmatación produce un bulbo de humidificación con tensiones positivas cercano a la saturación. A medida que prosperan los procesos de colmatación, la velocidad de infiltración disminuye, y la zona del bulbo se va desaturando, hasta igualar la conductividad hidráulica con el volumen infiltrado.

La entrada de aire en el acuífero desplaza al agua y aumenta la presión parcial bajo el nivel colmatante (Bouwer, 1982). El contenido en aire y agua provoca una histéresis en el acuífero, que varía a medida que se modifican las condiciones de humedad y secado en el suelo (Bouwer, 1978).

3.3.1.5. Compactación

Se trata de otro efecto negativo en las estructuras de recarga artificial, bastante común en sistemas superficiales. Está originado por entrapamiento de partículas con disminución de la presión confinante en el medio receptor, mecanismos que contribuyen a la generación de un cake superficial.

El mismo agua de recarga provoca una presión sobre el fondo que induce la infiltración, hasta que a partir de cierta carga, el fondo es sometido a una compactación directa, disminuyendo la infiltración.

Este espesor de la lámina de agua de recarga ha sido cifrado en 1,6 metros (Custodio y LLamas, 1983; Bouwer & Rice, 1989). A partir de este valor, el mismo peso del agua reduce la capacidad de infiltración.

Los niveles colmatados reducen la permeabilidad natural hasta el punto de ser el principal factor de control o cuello de botella en el proceso de infiltración, según queda esquematizado en la Fig. 1.43.

En caso de existir niveles colmatados, el agua de recarga funciona como un “agua colgada” que penetra en el acuífero principalmente por gravedad.



Fig. 1.43. Perfil de una zanja de infiltración con un nivel colmatado, flujo a través de la ZNS hacia el acuífero y franja capilar por encima del nivel estático (modificado de Bouwer, 2002).

3.3.1.6. Sinergias entre los mecanismos de colmatación

Una vez descritos los mecanismos de colmatación, su interdependencia y combinaciones, la actuación conjunta de determinados procesos produce efectos sinérgicos en las operaciones de recarga artificial. Algunos de los sinergismos más importantes son:

- Interacción entre comunidades de microbios y partículas coloidales minerales o metálicas, influidas además por la evidencia de la floculación entre arcillas y algas.
- Interacción entre coloides y precipitados, controlando gran parte de las reacciones de disolución-precipitación de calcita y óxidos de hierro. La fotosíntesis de las algas produce la precipitación de carbonatos e incrementos en el pH. De ahí la importancia de controlar el pH en el agua de recarga (*Pavelic & Dillon, 1996b; Dillon et al, 1996a*).

Según experiencias obtenidas en Seattle, una concentración de Total de Sólidos Disueltos (TSD) de 2 mg/l puede ser suficiente para reducir de forma significativa el caudal de recarga en los pozos. En esta experiencia, el análisis de las partículas colmatantes indicó que estaban constituidas, principalmente, por diatomeas y sulfato de aluminio (*Pyne, 1995*).

La Fig. 1.44 ilustra el proceso de variación de la infiltración del acuífero durante las operaciones de AR en función de la concentración de sólidos disueltos.

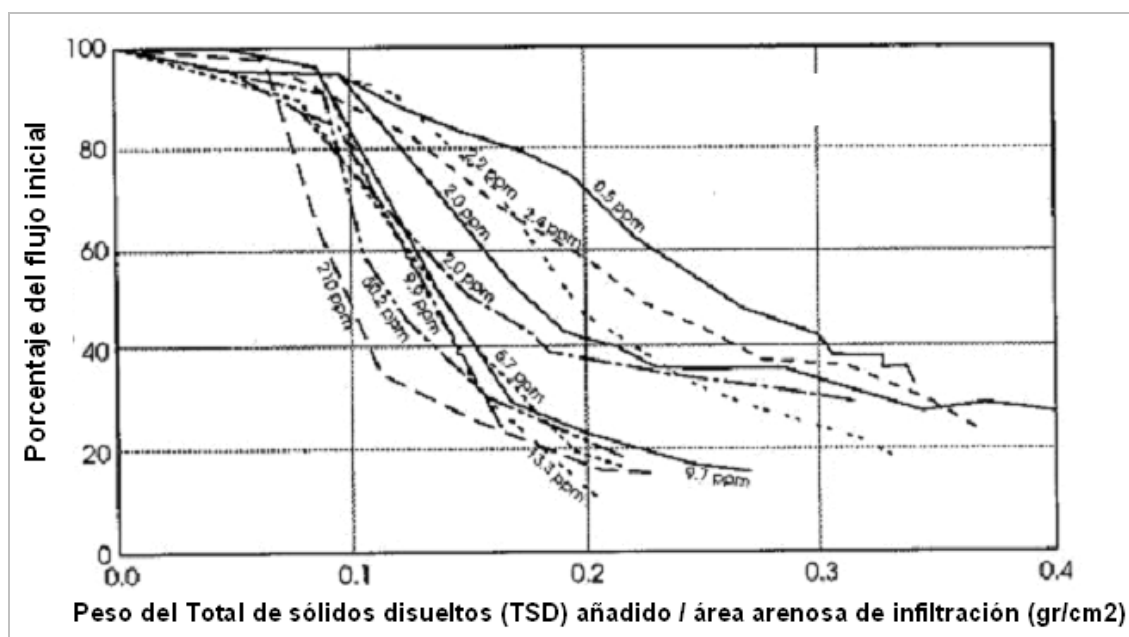


Fig. 1.44. Cambios en la capacidad de infiltración del acuífero durante la recarga en función de la concentración de sólidos disueltos. (Modificado de Bichara, 1986).

4. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Como apartado adicional al bloque de contextualización, se presenta un resumen del conocimiento de la zona de estudio como complemento del apartado denominado “estado de la cuestión.”

Se ha analizado el marco legal que subyace a todo el trabajo de investigación y realizado una amplia recopilación documental y valoración crítica de los antecedentes.

Un resumen de los considerados más importantes, tanto legales como técnicos, se presenta a continuación. Para ello se han estudiado previamente los aspectos insuficientemente conocidos.

Aquellos que han sido considerados de especial relevancia se adjuntan en el Anexo 1.1.

4.1. MARCO LEGAL

El “*Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente: 'Medio Ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos'*”, en el punto 2.1. establece como una de las actuaciones preferentes la “*mejora en la aplicación de la legislación vigente.*”

En este punto explica cómo la aplicación del amplio abanico de legislación comunitaria de medio ambiente y del programa LIFE han contribuido enormemente a mejoras medioambientales (que son enumeradas en el capítulo 1 del mismo *Programa*). Esta función ha sido compartida con otros actos jurídicos, como son los primeros instrumentos voluntarios introducidos a escala comunitaria: el Sistema de Gestión y Auditoría Medioambientales (EMAS) y la etiqueta ecológica europea. Estos actos, ejes de la política comunitaria de protección del medio ambiente, fueron modificados parcialmente con objeto de aumentar su coherencia y eficacia.

El punto especifica además que la aplicación, observancia y ejecución de toda la legislación vigente es una prioridad estratégica para el período de vigencia del Programa, empleando para ello los instrumentos jurídicos existentes, si bien la lentitud del procedimiento jurídico se configura como un impedimento para el cumplimiento del programa, que requiere un horizonte temporal de varios años, (*CEE, 2001*).

En España las operaciones de *MAR* representan una técnica infrautilizada que todavía no ha recibido consideración suficiente por parte de la Administración hidráulica del país. Un ejemplo de ello es la escasa consideración que recibe esta técnica en la legislación en materia de aguas y de medio ambiente.

Con objeto de estudiar la aplicabilidad del “Sexto Programa” en la legislación nacional y comunitaria, se ha realizado un análisis de la legislación vigente que pueda presentar relación, directa o indirectamente, con la *AR* y con la conservación y restauración de humedales.

Antes de entrar en materia, es de destacar el contexto actual, donde la jurisprudencia no cesa de emanar nuevas disposiciones en aras del desarrollo sostenible y del conservacionismo,

como corresponde al período de transición entre los siglos XX y XXI, etapa de acelerada evolución hidrológica en España y en la CEE.

Algunos de estos antecedentes considerados de mayor interés por el autor, tanto de ámbito comunitario como nacional y autonómico, son la casi traspuesta Directiva Marco de las Aguas (2000/60/CE, e.a. *DM*), el Plan Nacional de Regadíos (RD 329/2002, en adelante *PNR*) el Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001, e.a. *PHN*), la nueva Ley de Evaluación de Impacto Ambiental *EIA* (Ley 6/2001), la Ley de Aguas (RDL 1/2001, e.a. *LA*), el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 849/86, e.a. *RDPH*), el RD 606/2003, por el que se modifica el Real Decreto anterior, la Ley de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres (Ley 4/1989), y la normativa del Plan Hidrológico de Cuenca del Duero (RD 1661/98, e.a. *PHD*), etc.

La gran cantidad de legislación que abarca total o parcialmente los objetivos previstos es abultada. De ahí que el análisis de la legislación realizado se presente como anexo 1, extrayendo para este apartado las conclusiones más relevantes.

Las principales disposiciones que inspiran y delimitan los objetivos planteados en el ámbito comunitario, nacional y autonómico se mencionan a continuación, ordenadas en orden cronológico en dos bloques: relativas a las aguas y al medio ambiente:

4.1.1. Aguas

- Directiva del Consejo 76/464 CEE, de 4 de mayo de 1976, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad (DOCE n.º L 129, de 18 de mayo de 1976).
- Directiva del Consejo 80/68/CEE, de 17 de diciembre de 1979, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas (DOCE n.º L 20, de 26 de enero de 1980).
- Ley 29/85 de 2 de agosto, de aguas (BOE n.º 189, de 8 de agosto de 1985; corrección de errores BOE n.º 243, de 10 de octubre de 1985).
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico RD 849/1986 de 11 de abril.
- Real Decreto 2618/1986, de 24 de diciembre, por el que se aprueban medidas referentes a acuíferos subterráneos al amparo del artículo 56 de la Ley de Aguas (BOE n.º 312, de 30 de diciembre de 1986).
- Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los Ámbitos territoriales de los Organismos de Cuenca y de los Planes Hidrológicos.
- Orden de 16 de diciembre de 1988 (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo), relativa a los métodos y frecuencias de análisis o de inspección de las aguas continentales que requieran protección o mejora para el desarrollo de la vida piscícola (BOE n.º 306, de 22 de diciembre de 1988).
- Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas (BOE n.º 209, de 31 de agosto de 1988).
- Orden de 24 de septiembre de 1992, por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias, de acuerdo con lo establecido en el art. 88 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación

Hidrológica, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio (BOE n.º 249, de 16 de octubre de 1992).

- Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, sobre medidas de regularización y control de vertidos (BOE n.º 95, de 21 de abril de 1995; rectif. BOE n.º 114, de 13 de mayo de 1995).
- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias (BOE n.º 61, de 11 de marzo de 1996).
- Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.
- Real Decreto-Ley 9/1998, de 28 de agosto, por el que se aprueban y declaran de interés general determinadas obras hidráulicas (BOE n.º 207, de 29 de agosto de 1998).
- Ley 46/1999, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE n.º 298, de 14 de diciembre de 1999).
- Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE n.º 147, de 20 de junio de 2000).
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DOCE n.º L 327, de 22 de diciembre de 2000).
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE n.º 176, de 24 de julio de 2001; corrección de errores BOE n.º 287, de 30 de noviembre de 2001).
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (BOE n.º 161, de 6 de julio de 2001; Corrección de errores BOE n.º 184, de 5 de julio de 2001).
- Decisión n.º 2455/2001/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de noviembre de 2001, por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE. DOCE, 15 de diciembre de 2001.
- Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (BOE n.º 101, de 27 de abril de 2002).
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE n.º 45, de 21 de febrero de 2003).
- Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

4.1.2. Medio Ambiente

- Directiva del Consejo 85/337/CEE, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (DOCE n.º L 175, de 5 de julio de 1985).
- Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE n.º 155, de 30 de junio de 1986).



- Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación del Impacto Ambiental (BOE n.º 239, de 5 de octubre de 1988).
- Ley 4/1989, de 27 de marzo, de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres (BOE n.º 74, de 28 de marzo de 1989).
- Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (DOCE n.º L 257, de 10 de octubre de 1996).
- Directiva 97/11/CE que modifica la Directiva 85/337/CEE.
- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos (BOE n.º 96 de 22-4-1998).
- Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (BOE n.º 241, de 7 de octubre de 2000).
- Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE núm 111, de 9 de mayo de 2001).
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (BOE n.º 157, de 2 de julio de 2002).

4.1.3. Legislación autonómica de Castilla-León

- Ley 8/1994, de 24 de junio (Castilla y León), de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales (BOE n.º 174, de 22 de julio de 1994; c.e. BOE n.º 203, de 25 de agosto de 1994).
- Decreto 194/1994 (Castilla y León), de 25 de agosto, por el que se aprueba el Catálogo de Zonas Húmedas y se establece su régimen de protección (Boletín Oficial de Castilla y León, n.º 168, de 31 de agosto de 1994).
- Decreto 209/1995 (Castilla y León), de 5 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental de Castilla y León (BO Castilla y León n.º 196, de 11 de octubre de 1995).
- Decreto 109/1998 (Castilla y León), de 11 de junio, por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero y se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias (BO Castilla y León, n.º 112, de 16 de junio de 1998; c.e. BO Castilla y León, n.º 119, de 25 de junio de 1998).
- Ley 5/1998 (Castilla y León), de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 8/1994, de 24 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales de Castilla y León (BOE n.º 197, de 18 de agosto de 1998).
- Ley 10/1998 (Castilla y León), de 5 de diciembre, de Ordenación del Territorio de la Comunidad de Castilla y León (BO Castilla y León, n.º 236, de 10 de diciembre de 1998; corrección de errores BO Castilla y León n.º 223, de 18 de noviembre de 1999).

En síntesis se destacan las siguientes observaciones:

El RLA determina en el artículo 254, apartado 4, que las autorizaciones de vertido limitarán rigurosamente las concentraciones de las sustancias figuradas en la famosa relación

I¹⁰, con objeto de eliminar los efectos nocivos en el medio receptor. Las sustancias de la relación II quedarán sujetas a autorización de acuerdo con los respectivos Planes Hidrológicos de cada cuenca. De este modo, **resulta patente la necesidad de establecer un estándar de calidad para las aguas de recarga artificial.**

El PHD es la disposición que más aboga por la técnica de la AR, si bien designándola “técnica especial”. Del mismo modo, planifica y manifiesta una sólida proposición por llevar a cabo estudios y actuaciones relativas a su aplicación, y por la protección de las zonas húmedas de la cuenca.

La Directiva 2000/60/CE o DM ha representado un hito en la historia de la Comunidad Europea al poner un plazo para conseguir un estado cualitativo en aguas continentales y litorales. Define además con estándares de calidad el “estado ecológico de las aguas”, el “buen estado de las aguas” y otros términos que quedan acuñados e integrados en la literatura hidrogeológica. Considera además el empleo de nuevas técnicas y herramientas, como puede ser la modelación como medio para conseguir los objetivos propuestos.

En el PHN no se plantea la recarga artificial como una alternativa complementaria a los fines previstos, como un ejemplo más dentro del carácter rígido de la ley. Exclusivamente, en su apartado 3: “Análisis hidrológicos”, menciona la recarga artificial en el delta del río Llobregat.

En cuanto a aspectos medioambientales, hay un tomo completo abordando la situación. En lo relativo a humedales, la Ley, recogiendo la filosofía del *LBAE, 2000*, pone especial énfasis en garantizar un uso racional y sostenible de los recursos hidráulicos, preocupación que se trasluce a lo largo de todo su articulado. Entre éstos, por su singularidad, merecen especial mención: la gestión eficaz de las aguas para abastecimiento, la exigencia de máxima eficiencia en la gestión del recurso en las cuencas receptoras, la regulación de las reservas hidrológicas por motivos ambientales, la gestión de las sequías y regulación de zonas inundables, protección de las aguas subterráneas y conservación de humedales y actuaciones de sensibilización, formación y educación en el uso sostenible del agua.

En el mismo PHN la gestión de los humedales queda parcialmente regulada, obligando a la creación de un sistema de investigación y control para determinar los requerimientos hídricos necesarios que garanticen la conservación de los humedales, así como promover su recuperación, regeneración de sus ecosistemas y aseguramiento de su pervivencia futura.

Dentro de los comentarios suscitados por la Ley, y como ejemplo de los muchos trabajos realizados, existen tratamientos específicos a la recarga artificial, en los que los autores denuncian la falta de propuestas de normas para recuperar y realimentar los sistemas sobreexplotados, empleando para ello la recarga artificial directa (superficial o subterránea), o inducida (obras hidráulicas específicas). Las denuncias ante la falta de confianza en esta tecnología son sobresalientes (*p.e. Fernández Rubio, 2001; Villarroya, 2002; etc.*).

El PNR no contempla la AR como alternativa expresamente, si bien manifiesta cierta inquietud por el estado de los acuíferos en las zonas regables.

¹⁰ Las relaciones I y II son unas listas de sustancias contaminantes, con mención expresa de los valores límite y objetivos de calidad, que deben cumplir los residuos de determinadas sustancias peligrosas especificadas en el anexo de la Directiva 76/464/CEE.

El RD 606/2003 esclarece la necesidad de autorización para las operaciones de recarga artificial de acuíferos, indicando que sólo podrán otorgarse cuando con ellas no se provoque la contaminación de las aguas subterráneas.

La Ley 4/89 indica la necesidad y obligatoriedad de elaborar y mantener actualizado un inventario de zonas húmedas y conocer su evolución.

La Ley 16/2002 supone la trasposición de la Directiva 96/61/CE (ICCP). Sin alusiones específicas a la recarga artificial, ya en su preámbulo manifiesta, como uno de sus objetivos, articular el procedimiento administrativo para cualquier vertido a las aguas.

Los decretos autonómicos determinan qué zonas son *vulnerables* y establece criterios para la elaboración de códigos de buenas prácticas agrarias, sin abordar ni la recarga artificial ni las zonas húmedas específicamente en todo su articulado, salvo para su inventario y catalogación.

El Plan Forestal de Castilla y León reconoce en su medida V10.1.1.1. la necesidad de promover ante los organismos y departamentos competentes la adaptación de diversas normativas y procedimientos vigentes, como es la Ley Orgánica Autonómica 4/1983, para lograr una adecuada conservación de los ecosistemas acuáticos, especialmente aquellos en los que se desarrollen las actividades de pesca fluvial y lacustre, acuicultura, caza y explotaciones cinegéticas. En esta misma Ley organiza el Servicio de Caza y Pesca de la Junta de Castilla y León, incluyendo en sus actividades la protección de los ecosistemas acuáticos y la mejora de las poblaciones acuícolas y sus hábitats.

Después del análisis de todos estos documentos, las consideraciones hacia la recarga artificial y la conservación de las zonas húmedas son escasas, si bien queda bien definido el escenario de actuación.

También se considera aclarada tal atribución: la recarga artificial puede y debe ser considerada un vertido, en sentido amplio.

Extendiendo el análisis legal, se ha realizado un “*análisis léxico-gráfico*”, es decir, un estudio basado en el número de veces que aparece la palabra “recarga artificial” o “humedal” en la legislación vigente mencionada.

El resultado de este estudio concluye que la recarga artificial es contemplada de manera bastante tímida en la legalidad vigente, como se verá a continuación:

El PNR no menciona en todo su articulado los términos “*recarga artificial*” o “*zonas húmedas*”, si bien menciona en su artículo 2 el término “*acuífero*” con connotaciones conservacionistas.

La Ley 6/2001, de Evaluación de Impacto Ambiental, contempla la “*recarga de acuíferos superficiales o profundos*” en su anexo 1, apartado 1 y grupos 7 y 8. El término “humedal” es mencionado ocho veces en su articulado.

El Real Decreto 606/2003, Reglamento del Dominio Público Hidráulico, menciona el término recarga dos veces y la recarga artificial una vez: “*Quedan sometidas a autorización las recargas artificiales de acuíferos*”. Humedal y zonas húmedas no se mencionan y acuífero 15 veces con respecto a la sobreexplotación.

La Ley de Aguas de 1985 menciona la recarga artificial una vez: “*directrices para recarga y protección de acuíferos*” (Art. 40), y las zonas húmedas, seis veces.

La *nueva* Ley de Aguas 46/1999, de 13 de diciembre, menciona 14 veces el término “acuífero”, recarga artificial, una vez (Art. 114); zonas húmedas, dos veces, y humedal, 0 veces.

La DM o *Directiva Marco* 2000/60/CE, menciona 10 veces la palabra recarga, 3 veces la palabra recarga artificial como “*masa de agua recargada o aumentada*” (Artículo 11), “*recarga artificial de agua*” (Anexo II, 1, 2.1) y “*la alimentación artificial*” (2.2.). Aparece además cuatro veces la palabra humedal, y ocho veces la palabra acuífero.

El actualmente derogado PHN, Ley 10/2001, menciona en la memoria la recarga genérica cinco veces, una como “*recarga de los álveos*” (Art. 36), y cuatro como listado de inversiones (Anexo II). El término humedal aparece cinco veces, de ellas tres en el artículo 31, y “zonas húmedas” no se mencionan.

- En el tomo de “Análisis ambientales” aparece el término recarga 16 veces, 13 para recarga natural y tres para artificial.
- En el tomo de “Análisis económicos”, no aparece.
- En el de “Análisis hidrológicos”, 51 veces, de ellas 11 aluden a recarga artificial y una a recarga inducida.
- En el de “Análisis históricos...”, dos citas para recarga natural.
- Y, por último, en el de “*Delimitación y asignación de recursos en acuíferos compartidos*”, hay 4 citas para recarga natural, exceptuando tablas y figuras.

En el PHD aprobado por RD 1664/98 hay cuatro citas del término recarga, tres de ellas artificial, y ocho alusiones en tablas de inversiones, siendo la disposición con mayor densidad del término “recarga artificial” por número de páginas en su articulado, seguido de la DM.

En el Programa de Actualización del Inventario Hidrogeológico (PAIH) del MIMAM (*García de la Noceda et al, 1999*), en el capítulo 5, se alude a la recarga artificial en la cuenca del Duero como “*técnicas especiales que se han aplicado muy poco en la cuenca*”, a pesar de ser una de las cuencas con actividades de recarga artificial más desarrolladas. Finalmente, de todos los Planes Hidrológicos de Cuenca, es el PHD, de la cuenca del Duero el que más atención dedica a esta técnica, seguido del PHE, de la cuenca del Ebro.

4.2. ESTUDIO DE LOS ASPECTOS INSUFICIENTEMENTE CONOCIDOS DE LA CUBETA DE SANTIUSTE

Como etapa simultánea al estudio de antecedentes se ha prestado especial atención a aquellos aspectos menos estudiados en la bibliografía disponible relativos a la Cubeta de Santiuste, con objeto de profundizar en ellos.

Los principales trabajos se han realizado en la década de 1990, llevándose a cabo, y en sucesivas etapas, estudios relativos esencialmente a la climatología e hidrología con elaboración de balances hídricos, tratamiento de datos demográficos, evaluación de las extracciones, inventario de puntos de agua y de captaciones en uso y desuso, distribución de las captaciones en la zona de acuerdo con sus caudales de explotación, análisis y estudios de la hidroquímica del acuífero, inventario de focos contaminantes actuales y pretéritos, descargas del acuífero y transferencias subterráneas, estudios de la influencia de la tectónica del basamento en el funcionamiento de la cobertera detrítica, así como estudios de edafología, usos del suelo y actuaciones humanas.

En la actualidad, se están realizando nuevos estudios específicos, como son estudios por teledetección para profundizar en el conocimiento de la tectónica de basamento mediante reflejos, actualización del elenco de regadíos por haberse llevado a cabo recientemente la concentración parcelaria en este sector, mejora de la red foronómica y estudio de la hidrología de los cursos fluviales.

Quedan, por tanto, lagunas en el conocimiento relativas, sobre todo, a la subdivisión de la *Cubeta* en unidades homogéneas, la realización de balances hídricos zonales, la relación entre distintos puntos del acuífero superficial con los cauces fluviales de los ríos Eresma y Voltoya, y la respuesta del acuífero a las operaciones de recarga artificial, en cuanto a cantidad y calidad se refiere.

Además es preciso lograr un grado de detalle mayor en el conocimiento de las características geológicas e hidrogeológicas y en el funcionamiento de la *Cubeta*, así como en cuanto a su dimensión medioambiental (humedales degradados).

Se considera necesario, además, la realización de nuevos ensayos de permeabilidad, detección de pequeños depósitos fluviales fosilizados que puedan funcionar como drenes y conocimiento de los procesos hidroquímicos previsibles en la interacción entre el agua de recarga y el acuífero. Estos procesos presentan una problemática específica en cada zona por concentración de contaminantes en la zona no saturada, lagunas salinas fosilizadas, detección de niveles de arsénico por encima del límite de potabilidad, incremento en la salinización de las aguas subterráneas por retornos de riego, etc.).

El estado de la cuestión cuantitativa se estudia en el Bloque 2, la cualitativa se aborda en el Bloque 3. En el Bloque 5 se plantea una metodología concreta para su estudio y futuro seguimiento. Igualmente, los aspectos medioambientales son estudiados en el Bloque 4.

4.3. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DOCUMENTAL

La cantidad de información existente relativa a la Cubeta de Santiuste es bastante elevada, al haber contribuido a su conocimiento varias empresas, organismos oficiales y centros de investigación, si bien cada uno de ellos ha realizado estudios referentes a su especialidad, como es natural.

Dada la finalidad del presente estudio, al que se ha pretendido dotar de una visión lo más amplia posible e integradora, resulta imposible realizar una recopilación exhaustiva de todos estos trabajos, si bien se ha consultado la mayor cantidad posible de ellos.

De todos los antecedentes consultados, se han seleccionado y criticado aquellos que a juicio del autor son más relevantes, por aglutinar diversos aspectos y perspectivas sobre la Cubeta de Santiuste, citando el resto en la bibliografía.

Especial atención se ha concedido a los trabajos de carácter geológico e hidrogeológico realizados en la zona de estudio

A continuación, se presenta un breve resumen de los antecedentes bibliográficos consultados, acompañado de una valoración crítica de cada uno, especialmente en cuanto a su mayor o menor relación con los objetivos propuestos se refiere (el orden de presentación es arbitrario).

- **IGME: Estudio hidrogeológico del sistema n.º 11 (Cuenca del Duero) (1981)**

Este estudio desarrolla como principales objetivos el conocimiento de las posibilidades del acuífero en sus funciones de suministro, transporte, regulación, y, en general, utilización racional de sus recursos potenciales.

En dicho trabajo se realiza una descripción general de la geometría del acuífero y de sus parámetros hidrogeológicos (tenidos en cuenta en el actual estudio para validar los resultados obtenidos en la determinación de la situación óptima de infiltración), cuantificación de los recursos potenciales y su posible regulación, así como un estudio de los usos actuales y futuros del agua y de su calidad química.

- **ITGE: Informe sobre la hidrogeología de la zona de Villagonzalo de Coca, Villeguillo, Ciruelos de Coca y Santiuste de S. Juan Bautista (1989)**

El estudio contiene una minuciosa recopilación de antecedentes referentes al acuífero superficial de la zona de Coca en 1989, incidiendo especialmente en la problemática de los descensos de los niveles de agua como consecuencia de la “sobreexplotación”, analiza algunos de los problemas socioeconómicos implicados (abandono de cultivos, etc.) y propone una serie de alternativas.

El resultado es algo pesimista, al indicar que, como consecuencia de la explotación intensiva de aguas subterráneas, han variado las condiciones naturales del acuífero, lo que motiva

la desaparición temporal o definitiva de algunos de los drenajes naturales de la zona. Asimismo, predice un aumento de hectáreas de regadío y su dimensión hídrica implicaría un bombeo de cerca de 1.000 l/s del río Voltoya, caudal que resulta imposible de derivar en muchos años hidrológicos.

Si se intenta utilizar sondeos profundos (300 m) habrá que hacer un uso escalonado, cementando la zona correspondiente al acuífero superficial, evitando infiltraciones al profundo.

- **ITGE: Las aguas subterráneas. Estudio de síntesis (1989)**

Se trata de uno de los primeros estudios de carácter hidrogeológico a nivel nacional, en el cual se realiza un compendio de los trabajos llevados a cabo por el IGME. en materia de aguas subterráneas, con el fin de facilitar y argumentar la integración de los acuíferos subterráneos en el dominio público hidráulico a efectos de los actos de disposición o afección de recursos.

Este estudio de síntesis posee, por tanto, un gran valor como obra de consulta antes de abarcar cualquier estudio de índole hidrogeológica y de aprovechamiento de recursos hídricos. En él se recogen, por un lado, un conjunto de capítulos dedicados a temas de carácter general sobre el conocimiento que hasta la actualidad se posee sobre los recursos hídricos y su funcionamiento. Por otro lado, se realiza una detallada descripción de los distintos sistemas acuíferos (ubicación, volumen, importancia, productividad y calidad de sus recursos).

Respecto a la zona de estudio, este trabajo extrae, en el marco general de la Cuenca del Duero, y las principales características del sistema acuífero de los Arenales.

- **IRYDA-MAPA: Proyecto de Asistencia Técnica para el Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia) (1990)**

El estudio fue firmado por D. Guillermo Casas, ingeniero agrónomo del IRYDA, contribuyendo a su desarrollo los técnicos del ITGE.

En el informe se hacen recomendaciones específicas para la ejecución material de las obras e infraestructura de recarga, distinguiendo básicamente dos tipos, que son:

- La perforación de sondeos profundos que explotaran recursos del acuífero inferior. En la actualidad, esta alternativa se ha llevado a cabo en algunos puntos, lo que está provocando que parte del agua del acuífero superficial se descuelgue hacia el acuífero profundo a través de estos sondeos, así como un empeoramiento de la calidad hidroquímica del agua del acuífero superior por alcalinización y salinización.
- Recarga artificial del acuífero superficial con aguas procedentes del río Voltoya, mediante la cual se incrementarían los recursos y las reservas del acuífero superficial.

Los aspectos contemplados en el estudio se inspiran en una filosofía que caracteriza a la mayoría de los proyectos del MAPA: el estudio representa uno de los pilares de obras civiles futuras.

Para ello desarrolla una serie de apartados tendentes a esclarecer los siguientes aspectos:



- Estudio de las facies que constituyen los distintos compartimentos del acuífero multicapa.
- Estudio del acuífero superficial (principal involucrado en la recarga). Describe en primer lugar las características del acuífero: geometría, captaciones, piezometría y parámetros hidráulicos. La definición de la geometría se apoya en la realización de una campaña de sondeos eléctricos verticales (SEV), que se recogen en el Anexo A, así como de diagrfías y sondeos (Anexo B). Luego se detalla su funcionamiento hidrogeológico, determinando las zonas de recarga y de descarga del acuífero. Posteriormente se realiza un balance hídrico de acuerdo con el funcionamiento del acuífero.
- Recursos y reservas del Acuífero Superficial. Demanda de agua. En este punto se estima, en función de los datos aportados en el análisis de las entradas y salidas del acuífero, sus recursos y reservas disponibles, así como la demanda de agua para la fecha de realización del informe.
- Recarga artificial. Tras desarrollar el concepto de “recarga artificial” utilizado en el presente trabajo, se justifica la recarga artificial en el área de estudio a partir del análisis de la evolución de las reservas y demandas. Posteriormente aborda las características de la recarga mediante el estudio de la capacidad de almacenamiento óptima, el volumen y el caudal de recarga. En el último subapartado de este capítulo detalla los sistemas de captación y recarga propuestos.

Acompañan a esta Memoria dos anexos:

- **Anexo I. (Prospección Geoeléctrica).** Informe de la campaña de prospección geofísica de apoyo al estudio hidrogeológico, con el fin de determinar el espesor del acuífero Cuaternario en la *Cubeta*. Se realizaron 88 SEVs en tres zonas bien diferenciadas: zona Oeste, tierra de labor, zona Este (de bosque), por la problemática que presentaba esta última debido a la mayor resistividad de las arenas y zona con afloramientos terciarios. Con estos SEV se realizaron 15 cortes geoeléctricos y un plano de isopiezas del espesor de los tramos resistivos. En vista de los resultados, se aprecia que no quedó bien definida en la zona Este del acuífero la naturaleza del tramo resistivo, pudiéndose atribuir tanto a materiales cuaternarios, como a arenas, o materiales resistivos del sustrato terciario.
- **Anexo II. Diagrfías, sondeos y ensayos.** Este Anexo incluye la testificación de ocho sondeos mecánicos. Los *logs* realizados fueron *Gamma Ray*, para todos los casos, y densidad de doble espaciado (*LSD* y *BRD*) en algunos concretos.

Después aparecen los registros litológicos de 15 sondeos paramétricos que se realizaron para contrastar los datos obtenidos en los SEV.

Por último, se presentan cinco ensayos de permeabilidad efectuados en cinco de los sondeos, con sus correspondientes ensayos de bombeo.

El trabajo adjunta una colección de planos: Mapa de situación y del área de estudio, Mapa geológico, Mapa de isopacas del acuífero superficial, Mapa hidrogeológico y Cortes hidrogeológicos a escala 1:18.000.



Algunas de las novedades y aportaciones extraídas de este estudio son la afirmación de que en 1999 el Acuífero Superficial se encontraba descolgado del Acuífero Profundo, con respecto al nivel de saturación regional. Dentro de este acuífero superficial distinguían dos subunidades: la Oeste con dirección de flujo S a N, y la Este, con descarga hacia el Río Voltoya. Las permeabilidades obtenidas oscilan entre 32 y 67 m/día. En el estudio de recursos y las reservas, la demanda agrícola rondaba los 3,6 hm³/año en el sector Oeste. En cuanto a la recarga del acuífero, se encontró como método más idóneo el basado en obras de superficie.

Para finalizar, se plantean una serie de actuaciones y estudios adicionales, tales como el avance en el grado de conocimiento del sistema, previamente a la ejecución de las obras, proponiendo la complementación con un estudio posterior de, al menos, los siguientes aspectos: Perforación de sondeos mecánicos con extracción de testigo continuo, realización de ensayos de permeabilidad *in situ* y de ensayos de bombeo con piezómetro auxiliar, investigación geoelectrica de detalle al N de Villeguillo y S y SE de Santiuste, cartografía de un plano fotogramétrico de la zona de estudio a escala 1:10.000. Proclama la necesidad de una estación de aforos en el río Voltoya e instalación de un limnógrafo a fin de definir el régimen del mismo, el conocimiento de la calidad de sus aguas y el diseño de redes de observación piezométrica y de calidad de las aguas, así como estudios de la pérdida de la capacidad de infiltración en la recarga.

Muchos de estos aspectos han sido considerados en estudios posteriores, si bien otros todavía no han visto la luz en la actualidad.

- **Rey Benayas, JM.: Aguas Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de Acuíferos en Los Arenales (1991)**

Resumen de la Tesis doctoral del profesor Rey Benayas, cuyo planteamiento es principalmente ecológico, si bien contempla aspectos geológicos, hidroquímicos, medioambientales y, en general, de aquellas ramas con mayor incidencia en la ecología.

La publicación describe primeramente el medio físico y las distintas tipologías de humedales de la zona de estudio, y posteriormente los impactos que afectan a los hábitats de descarga de las aguas subterráneas y los factores de tensión detectados, con el objetivo de diseñar unas normas proteccionistas específicas.

El tema es abordado por un amplio abanico de factores analizados e involucrados, destacando los elementos: hidrológico, ecológico, medioambiental y socioeconómico (Fig. 1.45.).

Finalmente, el profesor resume en 25 conclusiones el resultado de sus trabajos.

- **Rey Benayas, JM.: Tipología y génesis de los ecosistemas de descarga de acuíferos en Los Arenales (1992)**

En este trabajo, y tras realizar estudios sobre muestras de agua subterránea, de suelo y comunidades vegetales, fotointerpretar la zona, así como un tratamiento de los datos estadísticos, se concluyó que se puede establecer una tipología genética y funcional de los hábitats de descarga de agua subterránea en Los Arenales.



Los principales factores que hidrogeológicamente controlan la variación ecológica de los humedales son:

- A) Dependientes del acuífero regional:
 - A1. Alternancia de áreas de recarga y descarga de agua subterránea.
 - A2. Evolución química del agua subterránea a lo largo de las trayectorias de flujo regional.
- B) Heterogeneidad de la composición litológica de los materiales del acuífero.

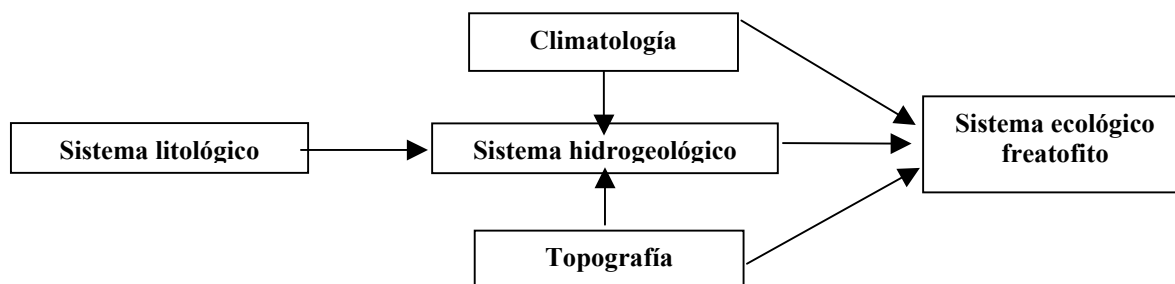


Fig. 1.45. Principales aspectos con influencia en la ecología de los humedales (modificado de Rey Benayas, 1982).

Los valores de estos ecosistemas están desapareciendo debido a la sobreexplotación del acuífero, principalmente su efecto positivo sobre la biodiversidad, interés científico y aporte de pastos naturales.

- **García-Amilibia, MA.: Ecología de los humedales de Los Arenales (1992)**

Trabajo descriptivo que describe características físicas y ecológicas de los humedales de los Arenales, destacando:

- Las lagunas de Los Arenales son muy someras, de aguas fuertemente mineralizadas y están sometidas a cambios estacionales muy acusados. Constituyen ecosistemas únicos en el ámbito de la Península Ibérica.
- Las fluctuaciones restringen la vida de un importante número de especies, mientras que el quimismo impone que los organismos posean propiedades fisiológicas capaces de regular las relaciones osmóticas entre el medio interno y el ambiente.
- Tanto la naturaleza del sustrato de la cuenca como las descargas regionales condicionan las características químicas de las lagunas, ya que las descargas regionales ceden cloruros y sodio mientras el sustrato cede sulfatos, bicarbonato, calcio y magnesio. Así del agua meteórica en su conjunto depende la salinidad total y las proporciones relativas entre los iones.

- **González Bernáldez, F.: Valores y funciones de los ecosistemas de descarga de acuíferos en Los Arenales (1992)**

El trabajo aporta como conclusiones:



En el acuífero de Los Arenales nos encontramos buenos ejemplos de humedales interiores de carácter estepario; muchos de los cuales no presentan agua en superficie ya que están alimentados por aguas subterráneas que pasan de la capa freática a la atmósfera por acción vegetal. También existen buenos ejemplos de núcleos endorreicos, dando lugar a multitud de Cubetas de agua que desdichadamente están desapareciendo debido fundamentalmente a cambios en la gestión del suelo (años 70), con el fin de transformar los tradicionales cultivos de secano en regadío, lo que supuso una extracción abusiva de agua subterránea que no se planificó y que ha supuesto la pérdida del motor principal de ecosistemas.

Destacan tres valores y funciones principales de los humedales, como son:

- Interés científico. Los humedales representan auténticos laboratorios vivos para el estudio de múltiples procesos naturales.
- Interés paisajístico. Constituyen un factor importante diversificador del paisaje y riqueza biológica.
- Interés socioeconómico. Los humedales han sido y son utilizados para muy diversos aspectos por parte del hombre.

El autor hace hincapié en que, en muchas ocasiones, el deterioro por parte de la actividad humana de los humedales viene condicionado porque no los entendemos lo suficientemente y los menospreciamos.

- **Rey Benayas, JM.: Diversidad de las comunidades vegetales en los humedales de los arenales y espacios protegidos (1992)**

La diversidad en espacios naturales es el criterio más utilizado en vistas a la concesión de protección legal. Este artículo desarrolla estudios encaminados a:

- Detectar las variables ambientales que más influyen en la diversidad en los humedales en Los Arenales.
- Humedales más característicos de acuerdo con este criterio.

La calidad química de la capa freática condiciona la composición de las comunidades vegetales. En determinados humedales, la capa freática presenta una mezcla de aguas de descargas del acuífero regional con acuíferos cuaternarios, lo que posibilita la presencia de especies muy diferentes que proporcionan un aumento en la diversidad.

Cabe señalar que tanto el calcio como el potasio no tienen un efecto negativo en la riqueza de especies; es más, el calcio la favorece debido a que amortigua el efecto tóxico de iones como el sodio, además de incrementar el número de especies raras.

En cuanto a las comunidades vegetales, dividiremos a estas en dos grandes grupos, como son:

- Comunidades modales. Ricas en especies comunes.



- Comunidades *outliers*. Ricas en especies raras o pobres en especies en general.

En este estudio, casi la totalidad de comunidades *outliers* son alcalinófitas o calcícolas. Las comunidades alcalinófitas son muy pobres en especies (*outliers*), debido al gran estrés ambiental, mientras que las calcícolas son *outliers* por presentar una gran riqueza en especies raras.

- **MOPTMA-MINER: El libro blanco de las aguas subterráneas *LBAS* (1994)**

Se realiza un análisis de la situación de la utilización del agua subterránea en España, señalando tanto los problemas que se presentan como sus posibilidades de desarrollo.

Los objetivos generales del trabajo quedan enmarcados dentro de los objetivos y medidas del Plan Hidrológico Nacional y los Planes Hidrológicos de Cuenca.

Fruto de este trabajo se presenta una serie de programas de actuación, que resumidamente, pueden quedar englobados en cuatro grandes líneas de actuación:

- Información y control de los acuíferos.
- Ordenación de las extracciones.
- Medidas de protección y aprovechamiento.
- Desarrollo de los recursos.

Con la definición de estos programas se pretende dar respuesta a la necesidad de mejorar, garantizar y ampliar la disponibilidad de recursos hídricos, así como la ordenación de la demanda potencial del sector.

- **MOPTMA: Informe sobre la posibilidad de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia) (1994)**

Este estudio, eminentemente empírico, fue realizado para estudiar la viabilidad de utilización de aguas del río Voltoya para recargar el acuífero de los Arenales.

Para ello se realizaron unos ensayos de permeabilidad con balsas de ocho días de duración. El caudal de deriva fue de aproximadamente 441 y 243 l/s, que equivalen a 4.4 hm³/año, con un aporte inicial de 8 hm³/año.

Los resultados obtenidos fueron de 6 m/día de velocidad de infiltración para la balsa 1 y de 10 m/día para la segunda.

Las conclusiones son que la viabilidad técnica de recarga del acuífero con agua del río Voltoya durante un período de siete meses al año es favorable para la “situación óptima” descrita, ya que los valores empíricos de permeabilidad horizontal y vertical son adecuados.

- **Galán de Frutos, L.A.: “Estudio para la ubicación del vertedero controlado Municipal de los residuos inertes y plan para la recuperación ambiental del área Cantera “Pinar Nuevo” (1995)**

Este trabajo desarrolla como principales objetivos el conocimiento de las características geomorfológicas, climatológicas, hidrogeológicas y edafológicas de un solar predestinado para la ubicación del vertedero de residuos sólidos inertes de Coca (Segovia), y su recuperación medioambiental.

El informe consta de los apartados:

- Estudio de antecedentes bibliográficos.
- Levantamiento de columnas litológicas.
- Estudio geomorfológico.
- Estudio climatológico.
- Estudio hidrogeológico.
- Estudio edafológico.

Las conclusiones más relevantes del estudio son:

- Tras el estudio de una serie climática de 45 años de la estación de Seguro de Coca, se observa que la temperatura media en la zona es de 10°-12°C, con una aportación pluviométrica de unos 600 mm y que la evapotranspiración media anual es de 700 mm.
- Los pozos que existen en las inmediaciones del futuro vertedero no afectan al flujo de aguas subterráneas, ya que están “colgados” respecto al nivel de la cantera.
- La permeabilidad del fondo de la cantera da valores entre $1.1 \cdot 10^{-6}$ y $9.8 \cdot 10^{-7}$ m/día, lo que representa velocidades de infiltración inferiores a $1.5 \cdot 10^{-3}$ m/día.
- En cuanto a la vegetación óptima para la regeneración ambiental, se aconsejan especies xerófilas y aclimatadas a regiones con pocas precipitaciones.
- Especial importancia para el fin que nos ocupa tiene el estudio y cálculo del caudal máximo de avenida.

- **CEDEX: “Estudio de la hidrología isotópica e hidroquímica del Acuífero de los Arenales” (1996)**

Estudio realizado por el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA), en concreto por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), que tiene como objetivo principal averiguar características hidrogeológicas del acuífero a partir de investigaciones hidroquímicas y de hidrología isotópica.

Para ello, y como fases preliminares, es determinada la recarga del acuífero de Los Arenales y realizado un balance hídrico, con establecimiento del período de renovación y datando las aguas del mismo.

El informe recoge, en primer lugar, las características generales de la zona de estudio en las siguientes materias:

- Geología: incluye una descripción de la Depresión del Duero y su evolución paleogeográfica a lo largo del tiempo, así como las diferentes unidades estratigráficas que la forman. Incluye también una breve descripción de la tectónica de la zona.
- Climatología: estudio realizado a partir de los datos de 24 estaciones pluviométricas y 12 termométricas en el que se han definido series de años secos, medios y húmedos, realizando los respectivos mapas de isoyetas. En ellos se puede observar cómo la precipitación aumenta hacia el borde meridional de la cuenca. Para entrar en un grado de detalle superior fueron seleccionadas tres estaciones situadas en las zonas de recarga, intermedia y de descarga, apreciándose una disminución de la pluviometría en el mismo orden. El apartado incluye además un “balance de agua” en el suelo para cuatro hipótesis de reserva (0, 30, 60 y 100 mm.).
- Hidrogeología: Expone las características de la Unidad Hidrogeológica de Los Arenales, definiendo los diferentes tipos de acuíferos de la zona, sus principales características (caudales específicos y transmisividades) y mapas de isopiezas correspondientes. Se incluye también un modelo de funcionamiento del acuífero, determinándose los diferentes tipos de flujos presentes en él.
- Hidroquímica: El grueso del informe se centra en los diferentes apartados dedicados a la química de las aguas, desde la medida de los parámetros inestables (pH y conductividad principalmente), hasta la caracterización de los 141 análisis químicos efectuados (diagramas de Piper, mapas e índices hidroquímicos), con la consiguiente evolución geoquímica de las aguas. Especial importancia reviste al estudio de los diferentes isótopos del agua, bien sean estables (deuterio, O^{18}) o radiactivos (tritio, C^{14} , C^{13}), que han sido utilizados como herramienta para determinar, entre otras cosas, la recarga del acuífero.

Con esto, y una vez analizados los diferentes datos disponibles, extraen las siguientes conclusiones:

- La distribución irregular de los diferentes parámetros químicos es incompatible con la existencia de un flujo regional dirigido. Se trata, por tanto, de una serie de lentejones de escasa entidad embebidos en una matriz de permeabilidad muy baja.
- La recarga tiene lugar principalmente por donde afloran dichos lentejones y por transferencias del Duero en algunos puntos, como demuestran los datos isotópicos.
- Las aguas son en general bicarbonatadas cálcicas, aunque al norte de Olmedo son cloruradas sódicas.
- La falla Alba-Villoria divide al acuífero de los Arenales en dos dominios, lo que viene reflejado en la relación de iones alcalinos y alcalinotérreos de las aguas a ambos lados de la misma.
- Las zonas con mayor concentración de nitratos coinciden con zonas de elevada actividad agrícola.

- Las aguas han sufrido una intensa evaporación con anterioridad a su infiltración en el terreno.
- Los estudios efectuados con los isótopos radiactivos Tritio y C^{14} arrojan una edad media de las aguas de 6.900 años.
- El 95% de la recarga de los acuíferos tiene lugar a través de sólo el 45% del terreno, existiendo cambios drásticos en pequeñas distancias.

Por último, vaticinan que de seguir el ritmo de explotación del año 1996, los niveles piezométricos en las zonas sin recarga sufrirán graves descensos debido a las dificultades existentes para la reposición de las aguas subterráneas extraídas por bombeo. Recomendán además que esta previsión sea tenida en cuenta en la planificación de la explotación futura del acuífero.

- **IRYDA: “Nota Informativa del Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia) para la Recarga del Acuífero” (1996)**

Se trata de un informe interno elaborado por D. Manuel Álvarez Chaín, geólogo de la Dirección General de Desarrollo Rural (MAPA). Esta nota complementa algunos aspectos abordados en el estudio previo que requerían una actualización, previamente a empezar una nueva etapa de investigación, con fines eminentemente prácticos.

- **ITGE: “Calidad química y contaminación de las aguas subterráneas en España, período 1982-1993. Cuenca del Duero” (1996)**

El objetivo de este documento es describir cualitativamente las aguas subterráneas en la Cuenca del Duero y los focos potenciales de contaminación que pueden afectar su calidad.

Para ello se ha realizado un estudio independiente para cada Cuenca Hidrográfica (CH), y dentro de estas, para cada Unidad Hidrogeológica (UH) sin llegar al nivel de detalle.

En cada CH se hace reseña de las características generales, y en las UH incluidas en cada CH se analizan los siguientes aspectos:

- Características hidrogeológicas.
- Calidad de las aguas subterráneas.
- Focos potenciales de contaminación.

A partir de la determinación temporal de las características químicas del agua y la observación de su tendencia evolutiva, presenta una aproximación a la situación de la calidad de los recursos subterráneos.

En el caso de la UU.HH. 17 “Región de los Arenales”, las características químicas naturales del agua subterránea son definidas en base a dos factores básicos:

- La naturaleza geológica del acuífero y del suelo.
- El funcionamiento hidrogeológico del sistema.

El informe presenta una caracterización, bastante simplificada, de las características hidroquímicas de las aguas, e indica cómo estos factores pueden verse influidos por condicionantes externos modificadores de la calidad de forma temporal o permanente, tales como alteraciones de origen antrópico originadas por actividades urbanas, agropecuarias, industriales e inducidas por bombeo.

Las alusiones al término “*contaminación*” son realizadas teniendo en cuenta su definición en el RD 1138/90. La evaluación de la carga contaminante procedente de los sectores anteriormente mencionados aparece para la totalidad de la unidad hidrogeológica, pero no constan datos acerca de los sectores de la misma. A escala de acuífero permite establecer relaciones entre los procesos de degradación detectados y el origen potencial de los contaminantes.

Con toda la información recopilada relativa a la calidad de las aguas, su evolución y la existencia de focos puntuales de contaminación, se realiza un análisis de las relaciones causa-efecto, y plantea una serie de recomendaciones para atenuar la carga contaminante existente. El trabajo adjunta una colección de planos temáticos a escala 1:1.000.000 de la Cuenca del Ebro: Mapa de actividad urbana, agrícola, ganadera, industrial y un mapa de calidad química.

- **MAPA: “Proyecto de las obras para la recarga artificial del acuífero de los Arenales, Cubeta de Santiuste (Segovia)” (1999)**

El proyecto está realizado desde una perspectiva puramente de ingeniería. Describe y da instrucciones para el diseño y construcción del azud y obra de toma de aguas fluviales, conducción y obra de recarga, justificando la solución elegida y presentando los cálculos justificativos del diseño, materiales, dimensiones y características de la obra civil. Tiene en cuenta siete criterios básicos:

- a) Económicos, compatibilizando economía con seguridad (se ha elaborado un *estudio de seguridad y salud*) y comportamiento idóneo.
- b) Sencillez, prescindiendo de técnicas que obliguen a un control de la obra minucioso.
- c) Hidrográficos, estudiando las características hidrológicas e hidráulicas del cauce en el que se ubica el azud de toma, fue simulado el comportamiento hidráulico del cauce mediante el modelo hidráulico *HEC-2*, tanto en la situación actual como en la modificada por la construcción del azud.
- d) Geológicos y geotécnicos, relativos tanto a la cimentación del azud como a la estabilidad de los taludes para la excavación de la zanja.
- e) Hidrogeológicos, abordando estudios de regulación, garantía y recarga que han servido de base para la determinación del caudal máximo a derivar del río Voltoya y de la superficie necesaria de infiltración que deberá tener la obra de recarga (*Arroyo de la Ermita*).

f) Medioambientales, en cumplimiento del Decreto 209/1995 de 5 de Octubre por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental de Castilla y León, fue realizada una Evaluación de Impacto ambiental simplificada.

g) Constructivos, aprovechando la época de estiaje.

En su valoración crítica, destacamos ciertos aspectos, como, por ejemplo:

- En el apartado 3 “*Factores a considerar*” y en el anexo 2.8 “*Evaluación simplificada de impacto ambiental*”, no se contemplan aspectos ecológicos con detalle, al ser una *Evaluación ordinaria* realizada por el mismo promotor.

- No hay un desarrollo amplio del modelo de precipitación-aportaciones, ni cálculos de avenida para períodos de retorno altos (avenidas muy ocasionales), que puedan incidir negativamente en las instalaciones de recarga, e incluso anegar las estructuras por depósitos de arenas movilizadas por la lluvia, aunque sí son previstas ciertas estructuras de defensa.

- El caz de recarga atraviesa pequeños sectores insuficientemente estudiados en los antecedentes previos, especialmente en el extremo sureste de la *Cubeta*, entre el azud de toma y la cabecera del Arroyo de la Ermita.

• **MAPA: “Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia).” Dirección General de Desarrollo Rural (MAPA) (1999)**

Informe complementario al realizado por el IRYDA en 1990, firmado por D. Ramón Galán, por parte de la Dirección General de Desarrollo Rural del MAPA, y por Juan Martínez y Enrique Fdez. Escalante, por parte de la empresa TRAGSATEC (medio propio del MAPA). El informe estudia inicialmente qué aspectos estaban insuficientemente definidos, para luego desarrollarlos. En este estudio se revisó y completó la caracterización física de la *Cubeta*, mediante nuevos perfiles de geofísica (SEV) y actualizando el inventario de puntos de agua. Se realizaron también seis sondeos de investigación con obtención de testigo continuo, en los que se realizaron ensayos orientados a la caracterización hidrogeológica del acuífero, así como ensayos de bombeo y pruebas experimentales de recarga. Durante el estudio se realizó un seguimiento de la evolución piezométrica y una caracterización hidrogeoquímica inicial de los acuíferos, estableciéndose el balance del mismo, con vistas a la realización del proyecto de obra.

Este estudio representa la base sobre la que fue realizada el proyecto de obra, reuniendo por tanto la información hidrogeológica y geotécnica precisa para contemplar aspectos ingenieriles.

Desde una óptica de investigación, se destacan ciertos aspectos, como por ejemplo:

- Se aprecia un excesivo empleo de procedimientos automáticos de cartografía e interpolación de datos puntuales, muchas veces no constatados en detalle, por ejemplo, la elaboración de mapas de isopiezas en ocasiones atraviesan pequeños afloramientos impermeables que no son contemplados en las cartografías a escala 1:25.000, como consecuencia de su escasa extensión.

- Los balances hídricos se han realizado con una única capacidad de campo.



- Se ha considerado la *Cubeta* “*un todo*” sin discretizar unidades homogéneas o de gestión en su interior.
- Se plantea una transferencia de aguas desde el acuífero al río Voltoya a través de drenes preferentes de origen tectónico, relacionados con la tectónica profunda. En los trabajos de campo desarrollados en el invierno de 2002 con objeto de obtener datos para el título de suficiencia investigadora, se ha apreciado una relación río-acuífero más constante, con una zona de descarga mucho más extensa de lo previsto en los antecedentes (posiblemente como consecuencia de las fuertes lluvias de noviembre y diciembre de 2001).
- Las terrazas del río Voltoya carecen de una cartografía detallada.
- Hay problemas para discretizar mediante la técnica de prospección geofísica SEV las litologías de terciario superficial alterado y cuaternario aluvial basal, al tener un comportamiento geoelectrico parecido, etc.

En este estudio se revisó y completó la caracterización física de la *Cubeta*, mediante nuevos perfiles de geofísica y actualización del inventario y concesiones. Se realizaron también seis sondeos de investigación con obtención de testigo continuo, en los que se realizaron ensayos orientados a la caracterización hidrogeológica del acuífero, así como ensayos de bombeo y pruebas experimentales de recarga.

Además fue realizado un seguimiento de la evolución piezométrica e hidrogeoquímica de los acuíferos, estableciéndose un balance actualizado del mismo.

- **Sahuquillo, A.: “La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas.” (1999)**

Este autor plantea una serie de medidas genéricas para prevenir y minimizar la contaminación de las aguas, muy a tener en cuenta en el diseño de alternativas obligatorio en todo EsIA. Entre ellas, destacan:

- 1) La eliminación o reducción de las fuentes de contaminación debe ser un objetivo prioritario dentro del enfoque combinado de protección medioambiental global. En el caso de focos contaminantes focalizados, las actividades tendentes a su eliminación se adecuan a los siguientes criterios:
- Prohibición de ciertas actividades que conlleven vertidos (enterramiento de animales muertos, vertidos incontrolados, empleo de pesticidas persistentes, etc.).
 - Aplicación escrupulosa de la legislación relativa a residuos peligrosos en cuanto a su producción, transporte, almacenamiento, etc., se refiere.
 - Traslado de determinadas actividades a zonas menos sensibles.
 - Incentivación al desarrollo de tecnologías y aplicación de productos menos impactantes sobre las aguas subterráneas (abonos alternativos, sistemas de cerramiento antifiltración en granjas, etc.).

- Control de fuentes puntuales mediante la supervisión de los permisos de vertido y del cumplimiento de exigencias técnicas, como el control de fugas y la minimización de pérdidas en las labores de llenado y vaciado.
 - Establecimiento de normas de carácter técnico para el abandono y sellado de captaciones.
 - Ubicación adecuada de puntos limpios, construcción de vertederos y balsas de lixiviados.
 - Incentivación del reciclaje y reutilización.
 - Desarrollo de campañas educativas y de sensibilización.
- 2) Establecimiento de un sistema de alarma en la red de control de la recarga (RCR) que permita detectar cualquier ascenso del nivel del agua sobre un nivel preestablecido que pueda representar problemas de inundación.
- 3) Inventario de fuentes de contaminación permanente. En él figurarán las fuentes tradicionales (industrias, vertederos activos o clausurados), las fuentes previsibles (actividades previstas potencialmente contaminantes), pozos negros, fosas sépticas y las de origen natural (intrusión salina continental), además de las difusas.
- 4) Búsqueda de mecanismos de financiación que aseguren su mantenimiento.

• **Iglesias Martín *et al.*: “El uso conjunto en el abastecimiento de agua de Madrid: recarga artificial” (2001)**

Estudio pionero de carácter descriptivo y metodológico en cuanto a experiencias de recarga artificial en la provincia de Madrid. El artículo es resumido a continuación:

En primer lugar se tipificó un sondeo perforado en el acuífero terciario detrítico de Madrid según las experiencias del CYII, y se atribuyeron unos parámetros hidráulicos tipo.

A partir de esta información, se analiza la viabilidad de llevar a cabo distintas alternativas de recarga y se describe una experiencia piloto realizada al norte de Madrid, en el paraje Casilla de Valverde, con un pozo de recarga-extracción, en la que se alcanzaron caudales de hasta 50 l/s circulando el agua en *lámina libre*.

Se analizaron además las interacciones entre las aguas de recarga, procedentes del río Lozoya, previamente tratadas en una Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) y las aguas del acuífero, tomadas en un aforo del pozo de recarga.

Las interacciones se simularon con el código de modelización directo PHREEQC. El agua resultante “*mejora la calidad del agua del acuífero*”, quedando subsaturada en casi todos los minerales, salvo goethita e hidróxido férrico amorfo, precipitando en una proporción tan escasa que “*no generará una reducción notable de la porosidad*”, ni en el empaque de grava ni en los primeros centímetros de la formación. Además, estos hidróxidos “*son eliminados en los bombeos periódicos de limpieza*.” No se determinan productos iónicos sino minerales que precipitan por encontrarse en sobresaturación.

Los resultados tras un período de bombeo han sido evaluados interpretando datos de recarga en el pozo de bombeo-inyección y en nidos de piezómetros, considerando los niveles inicial y final, la duración del ensayo, el caudal específico, la transmisividad, el volumen de recarga y la relación B/R (%). En los piezómetros se indica, además, las variaciones negativas (ascenso).

Se concluye, por tanto:

- Resulta prioritario comprobar el carácter hidrometeorológico del año (el artículo deja entrever el hecho e inconveniente de que precisamente los años más húmedos son los que permiten destinar más agua para la recarga).
- El artículo evalúa en un 5% la pérdida de agua de recarga por bombeos de limpieza con niveles altos, lo que minimiza el impacto energético.
- Finalmente dictamina que el uso conjunto permitirá compatibilizar la utilización de este acuífero como fuente estratégica de suministro de agua dentro de un marco de gestión sostenible.

La bibliografía cita un informe interno del CY-II del año 2000 denominado “*Análisis de la viabilidad de recarga del acuífero terciario detrítico de Madrid (U.H. 03.03) mediante recarga profunda. Simulación de los procesos geoquímicos*” que no ha podido ser consultado.

- **Armayer, A. et al: “Factores hidrometeorológicos y determinación de excedentes hídricos potencialmente utilizables en la operaciones de recarga artificial de acuíferos.” (2001)**

El artículo presenta la metodología utilizada para determinar las aportaciones históricas por procedimientos indirectos (estudio de hidrogramas) con vistas a cuantificar los excedentes hídricos que pueden ser destinados a la recarga artificial del acuífero costero de Jávea.

Según los autores “*el análisis de las disponibilidades hídricas probablemente constituye la etapa más importante en el estudio de viabilidad de un proyecto de recarga artificial*”, citando además la posibilidad de recargar con aguas pluviales y aguas residuales tratadas.

La metodología consta de las siguientes etapas:

- Restitución histórica aplicando un factor de corrección.
- Determinación de los excedentes hídricos superficiales.
- Ubicación de los dispositivos de recarga en zonas de máxima infiltración natural.

Durante el estudio fue implantado un infiltrómetro de inundación sobre el suelo en una de las zonas seleccionadas para la recarga. Además se ha dotado a la zona de zanjas y diques, y se ha realizado una simulación de la posibilidad de embalsamiento de la cuenca mediante GIS con bloques diagramas y curvas de nivel no superpuestos.

- **Fryar, A.: “Groundwater recharge and chemical evolution in the Southern High Plains of Texas (USA)” (2001)**

Trabajo que en contenido y metodología presenta un cierto paralelismo con los objetivos planteados en este trabajo de investigación.

El artículo expone el resultado de un estudio realizado en el acuífero de High Plains, en el que hay desarrollada una importante zona regable y con el que se abastece una importante extensión de Texas y Nuevo México.

Se han realizado análisis de aguas y suelos y contrastado con otros estudios, concluyendo que los procesos acaecidos durante la recarga del acuífero controlan la composición de las aguas subterráneas de un sector del acuífero. Para ello se han estudiado isótopos, datos hidroquímicos, análisis de precipitaciones, escorrentía, infiltración (fluctuaciones climáticas), concentración de solutos en la parte superior del suelo por evapotranspiración, y determinación de zonas de infiltración preferente (playas y zanjas) modificadas localmente por flujos de retorno de aguas residuales y de regadío.

- **MAPA: “Proyecto de asistencia técnica para la modelización matemática de la recarga artificial del acuífero de los Arenales, Cubeta de Santiuste (Segovia)”, (2002-2004)**

El desarrollo de este proyecto está previsto a lo largo de dos años a partir de mayo de 2002, como complemento a los estudios realizados previamente y para completar el grado de conocimiento previamente a las labores de recarga.

El principal objetivo a cumplir por el MAPA, de acuerdo con el pliego de prescripciones técnicas, es la adquisición de nuevos datos esenciales para la realización y posterior calibración de un modelo matemático, que facilite la gestión y las actuaciones de recarga mediante derivación de excedentes invernales del río Voltoya, y recarga a través del cauce modificado del “arroyo de La Ermita.” Para ello se pretende llevar a cabo los siguientes aspectos:

- Realización de tres campañas al año de foronomía y piezometría.
- Seguimiento de las redes de piezometría y de hidroquímica.
- Realización de nuevos ensayos orientados a la obtención de los parámetros hidráulicos del acuífero.
- Estudio de aportaciones: Se actualizará el estudio con los datos meteorológicos de las estaciones del área.
- Perforación de sondeos de investigación y ensayos complementarios.
- Estudio hidrológico del río Voltoya.

- Reprocesado y reinterpretación del modelo geofísico, reprocesando si fuera preciso los datos de las campañas de 1990 y 1999.
- Levantamiento topográfico de las redes de control ya definidas.
- Estudio de infraestructura y dispositivos para la recarga artificial.
- Análisis de las soluciones técnicas y legales para abordar el problema de la conexión vertical entre acuíferos a través de los sondeos profundos, con redacción de un informe-propuesta dirigido a la Confederación Hidrográfica del Duero.
- Incorporación de los datos y resultados obtenidos en las actuaciones descritas a la herramienta básica para la planificación de la recarga: el modelo matemático de flujo para el acuífero superficial. Una vez asegurada la calibración del modelo se entrará en su fase de explotación, realizando las simulaciones que se consideren de interés.
- Actualización y mantenimiento del modelo matemático.
- Estudio de la evolución de los regadíos por teledetección.

Una vez analizadas críticamente las principales referencias y antecedentes, realizada una valoración crítica y sectorizada la información, se aprecia que todavía hay zonas de la *Cubeta* insuficientemente conocidas, y que determinados aspectos del conocimiento no han sido abordados en estudios previos, bien sea por alejarse de los objetivos previstos, casi siempre prácticos, o por haber quedado desfasados con el tiempo, dado el enorme dinamismo del sistema.

A estos estudios hay que añadir los trabajos realizados por el IRYDA, TRAGSATEC, y diversas empresas privadas para la construcción de sondeos de abastecimientos y riegos. El resto de la documentación consultada se presenta al final del informe en el apartado “*Bibliografía*”.

4.3.1. Análisis del grado de conocimiento por sectores

En vista de lo expuesto en el apartado anterior, se aprecia que existen numerosos estudios a escala regional sobre el acuífero que difieren considerablemente entre sí en sus estimaciones.

La realización de estos estudios en distintas épocas justifica parcialmente tales diferencias.

Los estudios de climatología son abundantes, aunque, dado el carácter cambiante de las condiciones meteorológicas, se considera necesario abundar en ellos.

En la zona de estudio en concreto, se puede observar que la mayoría de los trabajos de hidrogeología han sido realizados al norte del núcleo urbano de Santiuste de San Juan Bautista y dentro de su término municipal y de la *Cubeta* (campañas de geofísica, ensayos de infiltración, estudios de meteorología y numerosos ensayos de bombeo), con objeto de posicionar espacialmente lo mejor posible los *paleocauces*, en caso de haberlos.

En el término municipal de Coca, y ante la existencia de extensos afloramientos de las facies terciarias tipo *Puente Runel* y *Cuestas*, aparece un mayor número de datos obtenidos del estudio para la caracterización de estas litologías, abundando también los datos de los arenales eólicos cuaternarios. El número de ensayos realizados en el acuífero superior en este término municipal es sensiblemente menor en *hidrogeología* y algo mayor en cuanto a ensayos de hidroquímica se refiere, especialmente estudios con trazadores, etc.

En el término municipal de Villeguillo, zona donde presumiblemente se han perforado los sondeos más eficientes de la zona, hay numerosos estudios realizados dentro de la *Cubeta* al sur del casco urbano y el Este de la Cañada Real, pero la estructura del subsuelo en su zona norte no es bien conocida y los parámetros y estimaciones existentes han sido obtenidos en muchos casos a partir de ensayos indirectos y estimaciones.

En esta zona, el cauce del Arroyo de la Ermita resulta de difícil seguimiento, los lentejones arcillosos en el subsuelo son más abundantes y el paleorrelieve del techo del acuífero terciario presenta una morfología compleja. Por tanto, parece *a priori* una zona menos propicia para la recarga artificial con aguas superficiales, aunque esta suposición está pendiente de constatar, siendo uno de los objetivos del presente trabajo.

Vista esta distribución zonal de los antecedentes, se ha ampliado la información de los sectores con menor densidad de datos (al sur del núcleo urbano de Santiuste y al norte de Villeguillo). Para ello se ha empleado información obtenida en nuevas campañas de prospección geofísica y perforaciones promovidas por el MAPA.

Así mismo, se han programado, diseñado y realizado ensayos de permeabilidad *in situ*, de laboratorio y de bombeo en las zonas centrales de la *Cubeta*, con objeto de obtener datos suficientes y representativos a nivel de la *Cubeta*.

En este contexto, el presente proyecto de investigación se ha realizado con la pretensión inicial de contribuir al conocimiento de la *Cubeta* de Santiuste en aquellos aspectos menos desarrollados, especialmente desde su dimensión hidrogeológica, hidroquímica y ecológica, como complemento a la labor prevista por la Administración.

Obviamente, esta tarea no tiene fin, por ello, al final del presente estudio (Bloque 6) se plantean nuevas líneas de investigación y desarrollo I+D, emanadas del estudio exhaustivo de antecedentes y de meditar sobre las carencias que presentan.

Otro objetivo es elaborar una serie de conclusiones con las que se pueda emplear la técnica de escenarios análogos en zonas con características parecidas, especialmente de España, y en las que está previsto llevar a cabo (o se están llevando) operaciones de recarga artificial, como puede ser La Moraña (Ávila, Valladolid), la comarca del Carracillo (Segovia-Valladolid), el valle del Esgueva (Valladolid), etc.

5. PRESENTACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

España es un país en el que, debido a su fisionomía y climatología, la recarga artificial de acuíferos está cobrando una creciente importancia. Es previsible que esta técnica siga en aumento, especialmente si se compatibiliza correctamente con los objetivos por los que aboga el actual PHN, Plan Hidrológico Nacional, entre los que caben destacar los trasvases intercuenas y la construcción de nuevos embalses.

Durante la última treintena se han desarrollado numerosos estudios y experiencias de recarga tanto superficial como profunda, aplicando distintas metodologías y en distintos ámbitos, habida cuenta de la amplitud de contextos existentes. Todas estas labores se han realizado con un común denominador: el aprovechamiento de excedentes hídricos para abastecimiento urbano, industrial y especialmente agrícola, fruto de la política desarrollista agraria que ha predominado en España durante la segunda mitad del siglo XX.

Algunos de los ejemplos de recarga artificial bien documentados, que actualmente se encuentran en proceso de operatividad y realización de estudios complementarios, o bien de construcción es la recarga de distintos sectores del acuífero de Los Arenales (UU.HH. 02-17) en la cuenca del río Duero. Este hecho es una consecuencia de la notable disminución de los niveles freáticos, originados por la intensa explotación a la que se han visto sometidas estas zonas durante las últimas décadas.

Ante este efecto, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del gobierno español, a través de su Dirección General de Desarrollo Rural, está realizando, conjuntamente con la Consejería de Agricultura de Castilla y León, estudios y actuaciones basadas en la recarga artificial de acuíferos para minimizar las alteraciones medioambientales y dotar a la agricultura de la zona de una oferta de agua que satisfaga su demanda (MAPA, 1999; Galán *et al*, 2001a y b).

Los sectores considerados son la Cubeta de Santiuste, actualmente en plena operatividad, la comarca del Carracillo, donde se están ultimando los estudios previos a la ejecución del proyecto de obra, y construyendo las infraestructuras básicas de recarga artificial superficial (MAPA, 2000; Fdez Escalante y López, 2002a). Estas comarcas se ubican en las provincias de Segovia y Valladolid.

Un tercer sector, objetivo inminente para operaciones de AR, es la comarca de la Moraña (provincia de Ávila), donde se están realizando estudios de viabilidad para la recarga artificial profunda, basados en la implantación de unas redes de control, instrumentadas y automatizadas, que transmiten datos directamente a las instalaciones de la Junta de Castilla y León a tiempo real (JCL, 1986-88). Conviene mencionar que, desde el inicio de los estudios, los tres sectores han sufrido varias etapas de inactividad por problemas técnicos y económicos. (MAPA, 1999; Galán *et al*, 2001 a y b).

La ubicación de estos sectores dentro del acuífero de los Arenales, UU.HH. 02.17, se presenta en la fig. 1.46.

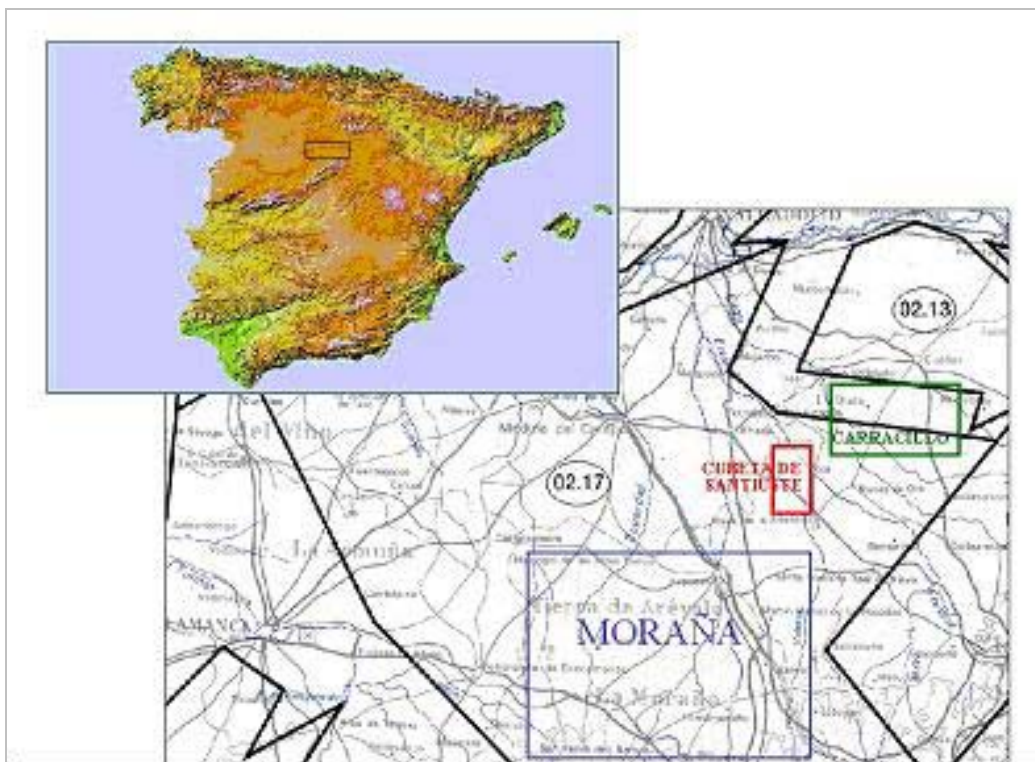


Fig. 1.46. Situación geográfica de las comarcas a escala 1:200.000 y posición en la Península Ibérica.

En concreto, la zona de tesis se ha centrado en una extensión que varía ligeramente en función de los objetivos.

El encuadre general se ha realizado a dos escalas diferentes. La primera, de carácter general, es de escala *regional* y comprende la totalidad del acuífero de los Arenales. A continuación se describen sus características geológicas e hidrogeológicas.

La segunda escala, designada “*local*”, es descrita con posterioridad a la regional. En ella se ha delimitado la zona de estudio a una superficie ligeramente superior a la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista, ámbito donde se han realizado los estudios hidrogeológicos y de recarga artificial que han dado pie a este proyecto de investigación.

5.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Desde el punto de vista geológico, la región, equiparable al acuífero de *Los Arenales*, está ubicada en la Depresión del Duero, sector meridional del Macizo Hespérico. Es una depresión de gran tamaño y forma asimétrica, debido a su comportamiento geodinámico, que se rellena de materiales terciarios y cuaternarios depositados en ambiente continental. Los mayores espesores de estos sedimentos se localizan hacia el Este.

Se distingue en ella dos regiones:

- El Perímetro Montañoso
- La Gran Llanura Central

La variedad litológica y la actividad tectónica sinsedimentaria da lugar a una heterogeneidad de materiales en el acuífero de los Arenales.

En los bordes de la cuenca, existen sedimentos detríticos proximales correspondientes a ambientes de abanicos aluviales, como consecuencia del levantamiento de los bordes. Estos pasan progresivamente hacia el interior a sedimentos de carácter distal. Sobre ellos se desarrollaron sistemas fluviales de canales de tipo “braided”, anastomosados o meandriformes, con llanuras de inundación marginales.

En la parte central de la cuenca predominan las facies lacustres, compuestas por arcillas y limos, que constituyen la denominada Facies Cuestas. Esta serie culmina con las Calizas del Páramo. El resultado es un entramado de unidades y facies sedimentarias interdigitadas (Corrales et al, 1979; Corrales, 1982).

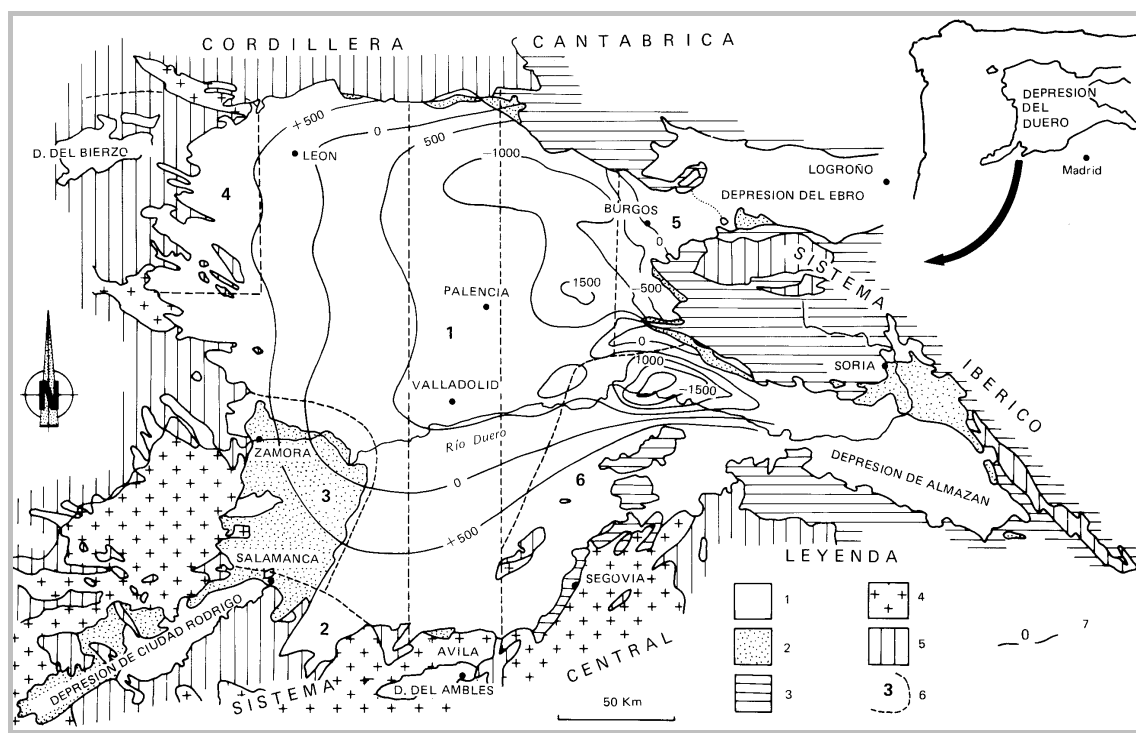


Fig. 1.47. Mapa de isobatas de la Cuenca del Duero. 1: Neógeno y Cuaternario; 2: Paleógeno; 3: Mesozoico; 4: Rocas plutónicas y metamórficas; 5: Paleozoico y Precámbrico; 6: Principales áreas investigadas; 7: Isobatas en metros (Alonso Gavilán et al, 1981; la depresión del Duero). Tomado de ITGE, 1989b.

5.1.1. Estratigrafía

A grandes rasgos, los materiales encontrados en la mayor parte de la región son de edad terciaria o cuaternaria.

5.1.1.1. Terciario

• Mioceno

El Mioceno detrítico continental está constituido por dos formaciones principales, las facies Puente Runel y las facies Cuestas.

- **Facies *Puente Runel***

Estratigráficamente constituye la unidad más baja de la serie.

Está constituida por arcosas fangosas ocreas con intercalaciones de pequeños canales de arcosas blanquecinas, a veces cementadas por carbonatos, dando lugar a un conjunto donde se observan secuencias granodecrecientes que, a menudo, culminan con la deposición de niveles carbonatados (suelos calcimorfos). La potencia de los canales arenosos puede alcanzar los 4 m y su extensión lateral superar los 10 m. Su dirección de aporte se produce hacia el NNO (IGME, 1982b).

Desde el punto de vista genético, esta unidad corresponde a depósitos distales de abanico, en los que predominan las coladas, instalándose esporádicamente algún canal fluvial. La cantidad de carbonatos indica que se trata de la zona de transición hacia la llanura aluvial (IGME, 1982a).

No hay afloramientos en el área de estudio, si bien ha sido detectada en sondeos profundos en torno a 80-100 m de profundidad.

- **Facies *Cuestas***

Están constituidas por margas grises y gris-verdosas, con algunas intercalaciones de yesos que pueden alcanzar los 15 m de espesor. Hacia el techo de la serie aparecen niveles carbonatados de espesor decimétrico con fenómenos de pseudomorfosis de yeso en calcita (Del Barrio y Fdez Pérez, 2001).

- **Subfacies *Arcillosa de Coca***

Estratigráficamente esta unidad se apoya mediante contacto normal sobre las Facies Puente Runel. Aflora a lo largo de los escarpes de los ríos Eresma y Voltoya, en las inmediaciones de Coca, así como en las “cuestas” morfológicas de las terrazas altas al O de la zona estudiada. Tiene un espesor que oscila entre 10 y 30 m.

Está constituido por una alternancia de niveles finos arcillo-margosos, más abundantes a techo, y capas de calizas de 0,2 a 2,5 m de espesor con fenómenos de pseudomorfosis de yeso en calcita.

El ambiente sedimentario que representa esta unidad indica una evolución hacia una mayor estabilidad de las charcas o “lagunas efímeras” de carácter salino.

Los principales afloramientos en la zona de estudio aparecen a lo largo de los escarpes de los ríos Eresma y Voltoya, al E de la zona, así como en su extremo NO. Su potencia es superior a los 30 m. No hay posibilidad de observar el muro en el área estudiada.

5.1.1.2. Cuaternario



- **Unidad Arévalo**

La Unidad Arévalo constituye el depósito asociado a la extensa planicie denominada Superficie de Coca-Arévalo, ocupa la parte central del área estudiada.

Se extiende desde las terrazas que se encuentran en una posición más elevada hacia el oeste. Su sección aflora en los escarpes de los ríos Eresma y Voltoya que discurren encajados unos 30-40 m bajo dicha superficie.



Fig. 1.48. Afloramiento de la Unidad Arévalo y de las subfacies arcillosas de Coca en la margen izquierda del río Voltoya.

Esta formación se apoya de forma disconforme sobre los materiales terciarios representados por la Facies Puente Runel al N y SE, la Facies Arcillosa de Coca en la parte central y la Facies de Margas y Calizas al SO. Su espesor es variable, pudiendo llegar a alcanzar los 40 m, debido a que rellena paleoformas de relieve acusado (MAPA, 1999).

Está constituida por arenas finas algo limosas de naturaleza silícea arcósica, y en menor medida feldespática e incluso calcárea, de tonos blancos y amarillentos, con intercalaciones decimétricas de gravillas y arenas gruesas de cuarcita, cuarzo, feldespatos, granitoides y lilitas, (IGME, 1982d). En ocasiones y de forma subordinada, aparecen limos, fangos y arcillas verdes (Pérez-González, 1979).

Los procesos principales que han intervenido en su génesis son fluviales y eólicos. Resulta aceptado que fue originada a partir de una gran superficie de glacioplanación, sobre la

que se instaló una red fluvial trenzada a favor de los paleocanales en el sustrato mioceno, que posteriormente fueron rellenados, extendiéndose lateralmente. En las depresiones adyacentes a los canales se depositaron arcillas y limos, con un importante aporte de arenas eólicas (IGME, 1982d). Son las “*Las arenas voladoras de la provincia de Segovia.*” (Hernández Pacheco, 1923).

Como resultado, la estructura de los depósitos de esta unidad es compleja, con secuencias de canales arenosos y de gravas con estratificación cruzada, interceptados por depósitos arcillosos o por dunas, y secuencias granodecrecientes debidas a desbordamientos (IGME 1982a y d). Las principales características de esta unidad son las siguientes (Pérez-González, 1979):

- Contacto basal erosivo.
- Carácter granodecreciente.
- Paso de estructuras de alta y baja energía hacia el techo de la secuencia.
- Estratificación cruzada en surco en el terreno basal, indicando la existencia casi exclusiva de ripples y barras en los canales.

Las direcciones de aportes medidas en los surcos muestran una clara tendencia de sur a norte.

En esta formación se han implantado la mayoría de los pinares de la zona.

• Depósitos de terraza

Los depósitos de terraza recubren buena parte de las zonas elevadas situadas al O de la superficie de Coca-Arévalo, disponiéndose en forma escalonada, y en suave descenso hacia los ríos Eresma y Voltoya. Así mismo, existen algunas terrazas de pequeña extensión, encajadas por debajo de dicha superficie, en los escarpes de estos ríos. Estos depósitos se disponen de forma disconforme sobre la Facies Arcillosa de Coca y Facies Puente Runel en la mitad septentrional de la zona estudiada, y sobre la Facies de Margas y Calizas en la mitad meridional, alcanzando espesores medios de 0,5 a 1,5 m.

Están constituidos por arcosas, ocasionalmente arcosas líticas, de tonos rojizos o blanquecinos, y gravas de cantos subredondeados a subangulosos de cuarcita, cuarzo, granitoides y lilitas (IGME, 1982a).

• Depósitos aluviales

Estos depósitos ocupan el fondo de los valles de los ríos Voltoya y Eresma, así como los de los arroyos más importantes que existen en la zona de estudio: Ermita, Cuadrón, Prado Largo, Valhondo, Estanquero, Salmoraz, Torrecilla, etc. Se disponen de forma disconforme tanto sobre las formaciones miocenas como cuaternarias, alcanzando espesores medios de 1 a 2 m.



Están constituidos por arenas, gravas y cantos de caliza, con un contenido variable de arcillas y limos arcillo-arenosos en los depósitos asociados a los ríos y por arenas con cantos y arenas limo-arcillosas en aquellos relacionados con arroyos (*IGME, 1982d*).

- **Depósitos de áreas endorreicas**

Se encuentran ocupando el fondo de áreas deprimidas y endorreicas, entre las que destaca la zona situada al N de Villeguillo y las lagunas de Valderruedas, Eras, Iglesia y Fuente Miñor, situadas en la parte occidental de la zona estudiada. Se disponen disconformemente tanto sobre materiales miocenos (subfacies Arcillosa de Coca y subfacies de Margas y Calizas), como cuaternarios (Unidad Arévalo), alcanzando espesores que raramente superan 1,5 m (*IGME, 1982a*).

Están constituidos por arcillas arenosas grises oscuras y limos, con altos contenidos en materia orgánica, concentrándose en superficie eflorescencias salinas que se originan en los períodos de estiaje.

- **Depósitos eólicos recientes**

Estos depósitos se extienden por la mitad oriental de la Superficie de Coca, recubriendo buena parte de la Unidad Arévalo. Se trata de depósitos residuales, muy degradados, que no sobrepasan los 0,4 m de espesor.

Están constituidos por arenas sueltas de grano fino a medio, color beige, con un contenido en limo en general inferior al 10%. Su área fuente son los afloramientos de depósitos de terraza, Unidad Arévalo y Facies Cuestas o Puente Runel (*IGME, 1982d*).

La Fig. 1.49 esquematiza la paleogeografía del Neógeno de la Cuenca del Duero.

5.1.2. Tectónica e historia geológica postmiocena

A finales del Mioceno Inferior comienza el plegamiento principal de los bordes de las mesetas (fase Neocastellana). Las facies del Paleógeno y Mioceno Inferior se adaptan a las nuevas deformaciones. Se produce además un levantamiento de los relieves circundantes, reactivándose la elevación del Sistema Central, con lo que quedan individualizadas las dos mesetas, que adquieren una configuración parecida a la actual, especialmente la Cuenca del Duero.

Tras esta etapa tectónica se inicia un gran ciclo sedimentario, que concluye con la sedimentación de facies lacustres a finales del Mioceno Superior y/o Plioceno Inferior en la zona. La sedimentación corresponde a facies de abanicos que evolucionan desde húmedos a áridos (Fig. 1.50).

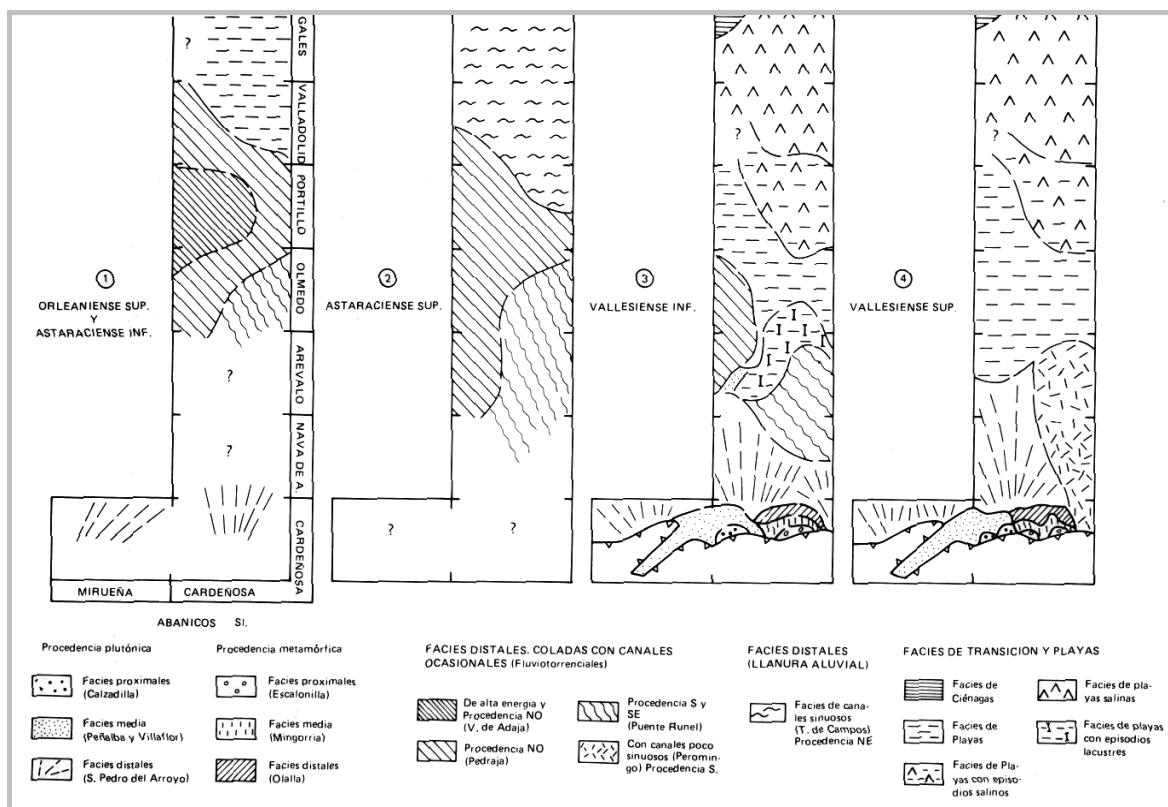


Fig. 1.49. Esquema paleogeográfico evolutivo del Neógeno de la Cuenca del Duero. (Portero et al, 1979, IGME, 1982c, Alonso, 1996).

A partir del Plioceno, se produce un basculamiento de la cuenca hacia el oeste (fase Rodánica o Iberomanchega), dando origen a amplios pliegues, a los que se asocian procesos erosivos “costras clásticas rojas” (Pérez González, 1979) recubriendo las depresiones formadas por el plegamiento de las calizas inferiores del Páramo. Seguidamente acontece un importante episodio kárstico que altera la caliza y la costra con la formación de “Terra Rossa.” Como consecuencia de la reactivación tectónica se depositan rañas (sedimentos de tipo torrencial por lo general) en los bordes.

Posteriormente, se instala la red fluvial cuaternaria, con una orientación preferencial, aprovechando probablemente las líneas de fracturación Tardihercínicas.

Rasgos tales como la progresiva disminución de las llanuras de inundación y la asimetría de los valles, con formación de terrazas en las márgenes izquierdas de los ríos, en esta zona al sur del río Duero, nos indica un proceso continuado de neotectónica, con variación del nivel de base y basculamiento hacia el noreste, así como el profundo encajamiento de los ríos Eresma, Adaja y Voltoya.

5.2. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL. EL ACUÍFERO DE LOS ARENALES

La Unidad Hidrogeológica “Los Arenales” [código 02.17 (MOPTMA 1993) y sistema acuífero 11 (IGME 1988)] abarca una superficie de 7.754,4 km² (MOPTMA, 1993). Está emplazada en el sector meridional de la Depresión del Duero.

Abarca una superficie de 7.754 km² y comprende parte de las provincias de Salamanca, Valladolid, Segovia y Ávila.

La fisiografía de la zona se caracteriza por las extensas llanuras de baja pendiente, cubiertas en gran parte por dunas, que fueron estabilizadas por los pinares existentes (Fig. 1.51).

Ocupa la margen izquierda del Duero hasta la divisoria con el río Tormes y el Sistema Central, siendo el Duero la única vía natural de drenaje. Este río divide la cuenca en dos, siendo los ríos de la margen norte más largos y caudalosos (Cordillera Cantábrica) que los de la margen sur (Sistema Central).

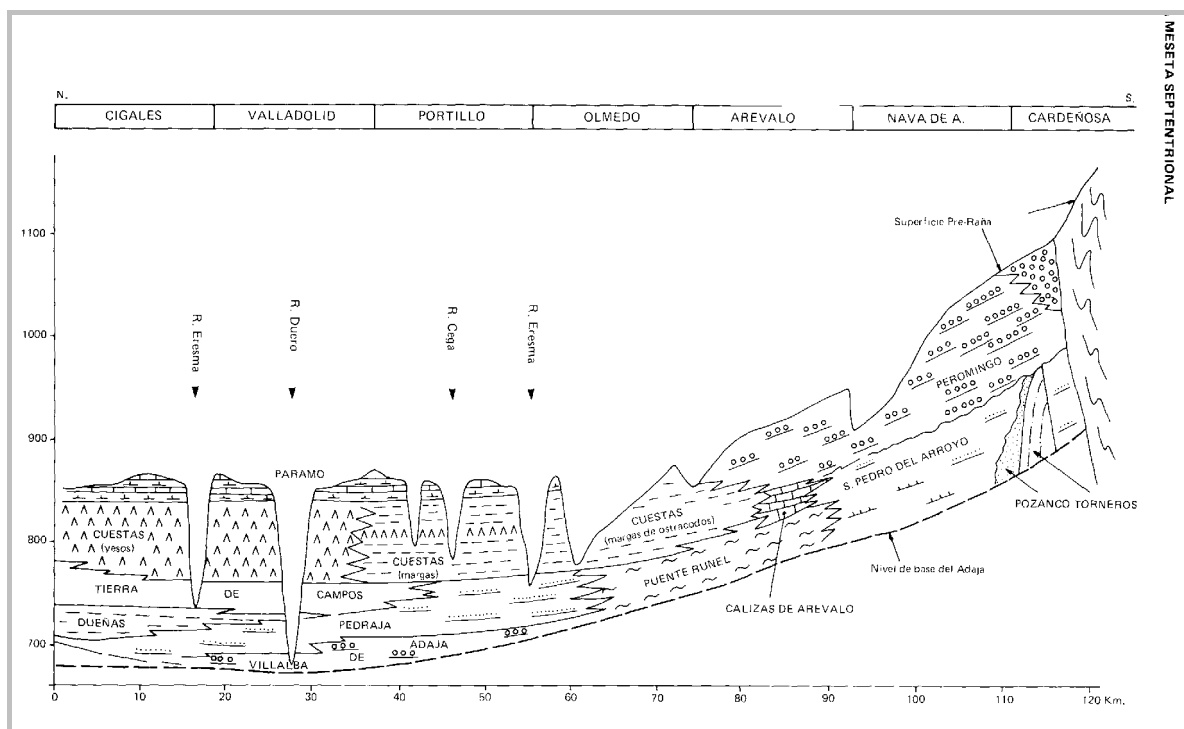


Fig. 1.50. Esquema estratigráfico del Neógeno en la transversal norte-sur de la Cuenca del Duero, (Portero García et al, 1979-1983).

Los principales ríos que la atraviesan, además del Duero, son el Zapardiel, Adaja, Eresma y Voltoya en la zona de estudio e inmediaciones. Otros sectores del acuífero regional son drenados por los cauces de los ríos Pisuegra, Esla y Tormes, de escaso encajamiento debido a la escasa pendiente de la llanura y a los materiales permeables existentes en la Meseta, con tasas de infiltración bastante altas.

Los valles que forman los ríos presentan morfología de artesa y la dirección de los valles es sureste-noroeste.

La recarga procede prácticamente en su totalidad de la infiltración del agua de lluvia, cifrándose en 430 hm³/año (ITGE, 1989a y b).

La Fig. 1.52 presenta las distintas regiones hidrogeológicas de la UHG. 02-17.



Fig. 1.51. Secuencia sedimentaria típica de sistema dunar (estratificación cruzada de bajo ángulo) en el talud del río Eresma dentro del TM de Villeguillo y en el arenero del Puente Chico de Coca.

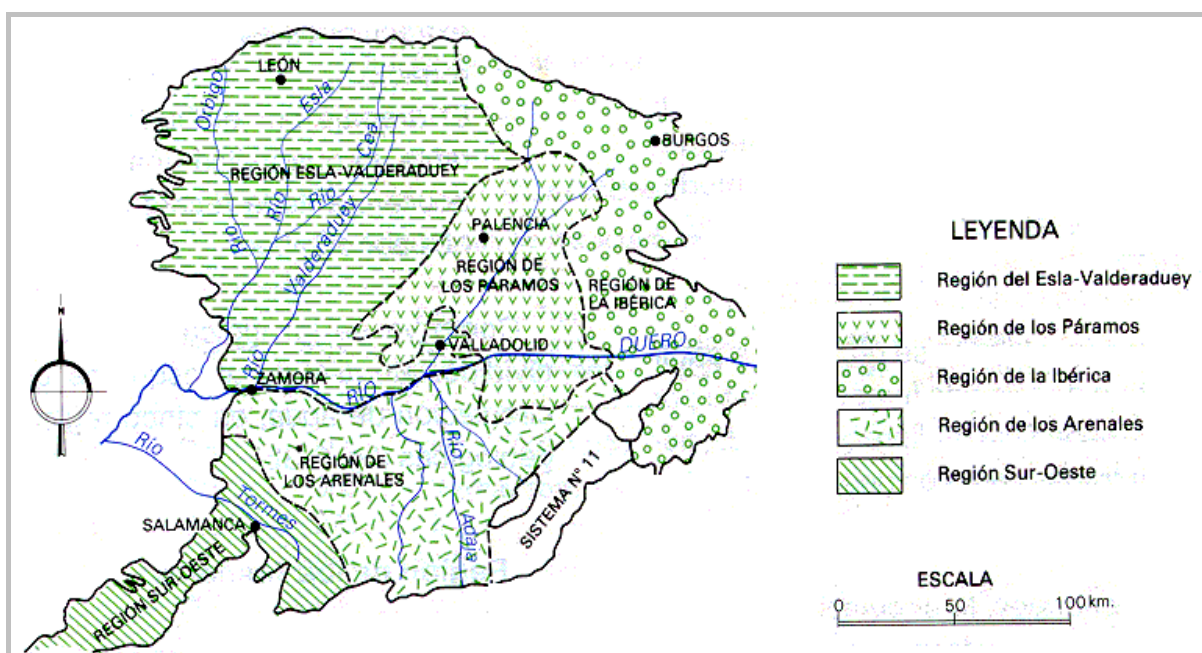


Fig. 1.52. División del Terciario detrítico en Regiones hidrogeológicas, (tomado de IGME, 1993).

Su ubicación dentro de la cuenca del Duero y su esquema de funcionamiento se presentan en las Figs. 1.53 y 1.54.

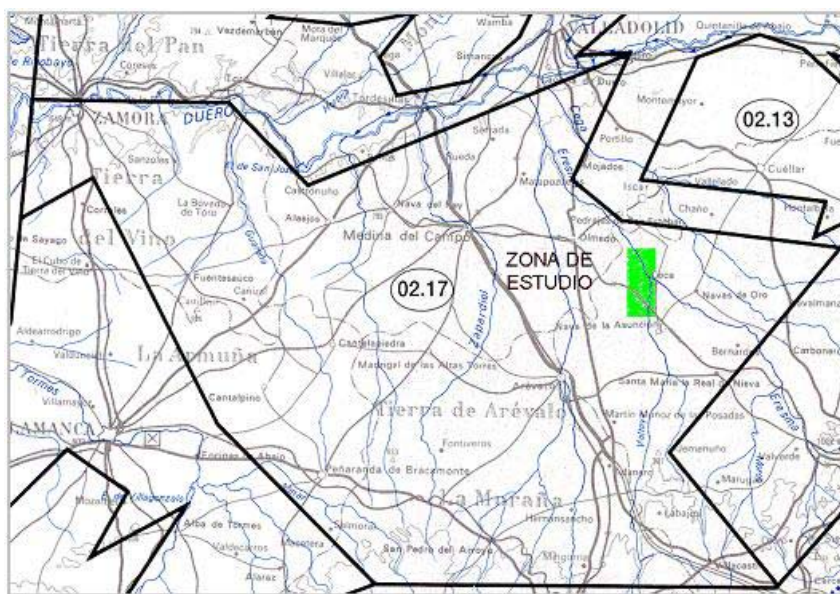


Fig. 1.53. Trazado de la poligonal de la Unidad Hidrogeológica Los Arenales (UU.HH. 02-17). El rectángulo corresponde a la zona de estudio, (modificado de ITGE, 1996). Figura sin escala.

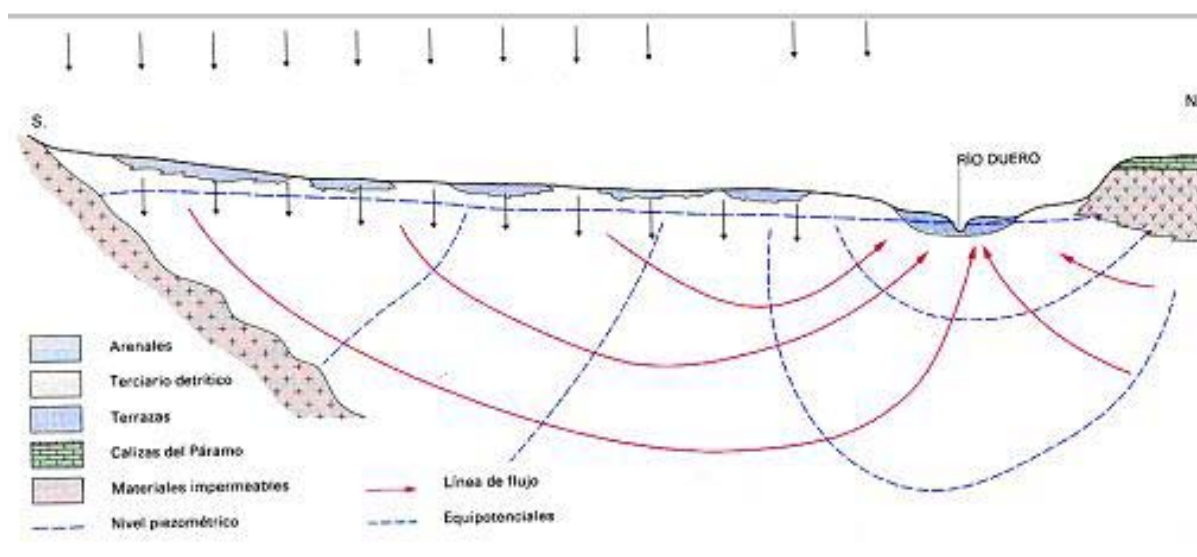


Fig. 1.54. Esquema del funcionamiento del acuífero de Los Arenales (IGME, 1989, tomado de ITGE, 1993a).

El comportamiento del acuífero relativo al flujo profundo es esquematizado en la Fig. 1.54. En ella se aprecia la generación de unas líneas de flujo a escala de cuenca hidrográfica, que son drenadas por el río Duero.

Dada la lejanía de la zona de estudio al cauce principal y la relativa cercanía al Sistema Central (materiales impermeables), cabe pensar en un flujo parecido al anterior, con menores recorridos y menor periodo de residencia del agua en el acuífero.

Dentro del área de estudio (incluida en la U.H. 02-17), en concordancia con la estructura del acuífero regional, son diferenciadas tres unidades con un comportamiento hidrogeológico diferente:

5.2.1. Acuífero o Unidad superficial

Constituida por las formaciones cuaternarias correspondientes a depósitos de origen fluvial y eólico (Unidad Arévalo principalmente) y que da lugar al acuífero superficial.

Las formaciones cuaternarias que constituyen el acuífero superficial en la zona presentan espesores de hasta 50 m de espesor. En concreto, el depocentro de las cubetas deducidas con las campañas de prospección geofísica en el sector Oeste de la Cubeta de Santiuste indican valores de hasta 50 m, ajustándose a paleorrelieves agrestes en zonas puntuales, donde se mezclan materiales cuaternarios de colmatación de la *Cubeta* y terciarios alterados y entremezclados. En el sector Este los depocentros máximos son del orden de 25 m. (MAPA, 1999a).

El nivel freático se encuentra a una profundidad media de 4 a 5 metros en la zona de estudio.

La existencia de canales de arenas y gravas y de niveles de limos y arcillas confieren a este acuífero una cierta heterogeneidad y anisotropía, especialmente en el trazado del paleocauce cuaternario principal que disecciona al sector Oeste de la *Cubeta* (Galán et al, 2001b).

Los valores de permeabilidad calculados para este acuífero oscilan entre 25 y 70 m/día. La transmisividad está comprendida entre 201 y 678 m²/día (MAPA, 1999a).

En general las aguas son bicarbonatadas cálcicas y magnésicas con abundante sílice y hierro en disolución, en forma de sexquióxidos (IGME, 1982d).

Considerando las características orográficas, posición del nivel freático, espesor de acuífero, etc., el sistema de recarga artificial más recomendable es mediante obras de superficie, bien con balsas o con canales o zanjias excavadas a lo largo del arroyo de la Ermita (IRYDA, 1990).

5.2.2. Acuífero o Unidad intermedia

Constituida por materiales terciarios de baja permeabilidad (facies *Cuestas*), que se comportan como un acuitardo, e incluso como un acuífugo, desconectando las otras dos Unidades, si bien presentan vetas intercaladas con comportamiento acuífero.

Las facies comprendidas entre ambos acuíferos (facies *Cuestas*) presentan un comportamiento de acuitardo o acuífugo de baja a muy baja permeabilidad y una elevada heterogeneidad y anisotropía.

En las perforaciones realizadas se aprecia la alta irregularidad de esta serie, aunque han sido detectados pequeños estratos decimétricos de tobas y otras litologías permeables en torno a los 70 m de profundidad, constituyendo un acuífero de escasa importancia y quimismo peculiar (MAPA, 1999a).

5.2.3. Acuífero profundo o Unidad Inferior

A mayor profundidad se desarrolla un acuífero profundo desconectado de los anteriores y designado “Unidad Inferior.” Está constituido por materiales detríticos terciarios de permeabilidad media (facies *Puente Runel*). Se encuentra relacionado con el nivel de saturación regional del acuífero asimilable a la UU.HH. 02.17, conocido también como “n.º 8: *Acuífero Terciario Detrítico Central del Duero*” (IGME, 1978-1982 y 1979).

En el área de estudio, el acuífero profundo se encuentra desconectado hidráulicamente del acuífero superficial, al interponerse un acuitardo de muy baja permeabilidad, si bien existe una cierta miscibilidad de aguas en los sondeos penetrativos que interconectan los distintos tipos de acuíferos (*Galán et al, 2001b; Fdez Escalante y López, 2002b*).

La existencia de canales arenosos con direcciones de aporte al NO y N, dentro de un conjunto areno-arcilloso, confiere a este acuífero una acusada heterogeneidad y anisotropía.

La calidad de las aguas subterráneas está condicionada sobre todo por la existencia de depósitos evaporíticos margo-yesíferos intercalados entre los materiales detríticos, dando lugar a aguas cloruradas y sulfatadas con altos contenidos en sales. También es debida a la disolución de sales presentes en el acuífero, y al tiempo de residencia de las aguas, que requiere grandes períodos de permanencia, como consecuencia del gran espesor del acuífero y de los largos recorridos de las aguas a través de él.

Por tanto, la calidad del agua depende en gran medida de la profundidad de las captaciones, y por tanto, de la profundidad a la que se realizan las extracciones de dichas aguas, y obviamente de la ubicación de éstas. A todo esto hay que añadir la importancia de procesos contaminantes, (*IRYDA, 1990*).

Todos los condicionantes mencionados indican que el funcionamiento del acuífero se ajusta a un modelo conceptual de *Tóth* (*MAPA, 1999b; Rey Benayas, 1991*). Este modelo, definido en ámbitos de escala regional, distingue varios tipos de flujo a distinta profundidad y con distinto tiempo de permanencia del agua en el acuífero, (*Tóth, 196; Rey Benayas, 1991*):

- Sistemas regionales: La zona de recarga corresponde a la zona más elevada de la cuenca y la de descarga a la más deprimida.
- Sistemas de flujo intermedios: Existen dos o más zonas elevadas y deprimidas entre el área de recarga y descarga, pero éstas no ocupan las posiciones más alta y baja, respectivamente, de la cuenca.
- Sistemas de flujo locales: Las áreas de recarga y descarga son adyacentes y el flujo tiene un control topográfico.

En el área de estudio podemos distinguir tres tipos de sistemas de flujo equiparables a los definidos en este modelo conceptual: Flujos *locales* (dominantes en los paisajes drenados con un basamento impermeable o el zócalo cristalino a escasa profundidad), *intermedios o subregionales* (en la mayor parte del área de estudio), y *regionales* desde posiciones de borde de cuenca (Sistema Central) hacia las redes fluviales de descarga (río Duero). El período de tiempo desde la recarga a la descarga es largo, por lo que pueden aparecer fenómenos de termalismo y

salinizaciones anómalas. Los sistemas de flujo conceptualizados se presentan en las Figs. 1.54 y 1.55.

La confluencia en la zona de estudio de flujos locales, de cortos períodos de residencia, y flujos intermedios, de períodos de residencia del agua en el acuífero más altos, ha condicionado la génesis de humedales en el sistema. De este modo se han inventariado humedales de aguas dulces, y un sistema de humedales de alta salinidad: *El complejo Coca-Olmedo*, originado por flujos ascendentes de alta salinidad, (Rey Benayas, 1991), como quedará demostrado en los bloques 3 y 4 del estudio.

Este fenómeno también ha sido detectado en las terrazas de los ríos cerca del Duero, donde se han desarrollado humedales mediatizados por las características de los flujos regionales, envejecidos, y del agua poco mineralizada de los acuíferos cuaternarios, con especies glicófitas, alcalinófitas y halófitas (Rey Benayas, 1991).

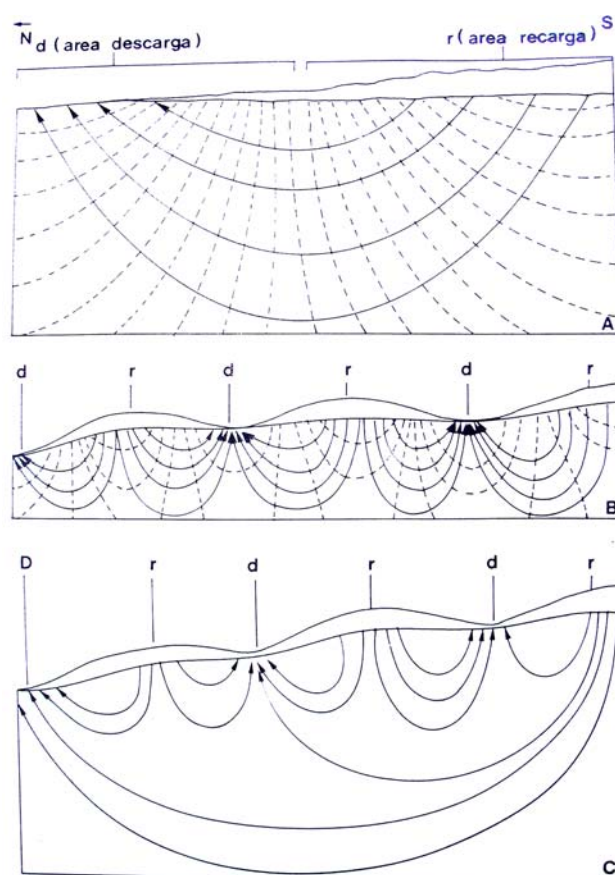


Fig. 1.55. Sistemas de flujo del agua subterránea en el área de estudio. A: sistema regional. B: Sistemas locales. C: Todos los sistemas de flujo (tomado de Rey Banayas, 1990).

5.3. ENCUADRE LOCAL. LA CUBETA DE SANTIUSTE

En este apartado se presenta la zona de estudio con cierto grado de detalle. Para ello se define su marco físico, geología, su funcionamiento hidrogeológico, suficientemente conocido y divulgado en los antecedentes consultados, y la definición de las “condiciones de referencia” o “entorno preoperacional” para los objetivos medioambientales.

5.3.1. Condiciones de referencia¹¹. El entorno preoperacional de la zona de estudio

En el sector meridional oriental del acuífero de los Arenales se encuentra la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Se trata de un pequeño acuífero de aproximadamente 85 km² de extensión, con morfología lineal.

Está delimitada por límites físicos: Cauces de los ríos Voltoya y Eresma por el Este. Los límites oeste, norte y sur están constituidos por afloramientos de materiales terciarios (en general colinas margosas), que en ocasiones presentan un delgado tapiz arenoso superficial (*Corrales, 1979*). Esta desconexión ha posibilitado la formación de un acuífero superficial, de funcionamiento individualizado con respecto al acuífero subyacente regional, del que le separa un acuitardo de baja permeabilidad.

El enclave goza de cierta autonomía física con respecto al sistema en que está integrado, y constituye la principal zona de estudio y experimentación del proyecto de investigación. Esta desconexión confiere a la calidad de sus aguas un quimismo peculiar.

En sucesivos apartados nos referiremos con frecuencia a este enclave con el apelativo “*la Cubeta*.”

Los límites de la zona de estudio son dependientes del fin previsto, al haber procesos de escala regional, que no pueden ser considerados en un estudio de ámbito local.

De toda esta extensión, el acuífero superficial, principal objetivo de este estudio, abarca una extensión que ha sido digitalizada y planimetrada, resultando una superficie neta de 42,19 km².

Dada la importante componente cartográfica del presente estudio, se propone una zona de estudio rectangular de 264 km², cuyas coordenadas UTM de los extremos son:

X	Y
363.000	4.575.000
375.000	4.575.000
363.000	4.553.000
375.000	4.553.000

Cartográficamente, la *Cubeta* está comprendida en las hojas a escala 1:50.000 n.º 428 (Olmedo), 455 (Arévalo), 429 (Cuellar) y 456 (Nava de la Asunción).

¹¹ El término “condiciones de referencia” ha sido adoptado como adaptación del término “entorno preoperacional” de la legislación medioambiental al contexto establecido tras ser aprobada la Directiva Marco del agua en materia hidráulica. Precisamente en esta Directiva queda definido dicho término.

En tan reducida extensión se ha ubicado una importante zona de cultivo, basada en la explotación de aguas subterráneas del acuífero cuaternario superficial, provocando un descenso del nivel freático acumulativo de hasta 10 metros, lo que ha provocado que se secan los pozos antiguos de gran diámetro, comenzando una etapa de construcción de sondeos y reperforación de las captaciones preexistentes “*por contagio*”¹².

A efectos administrativos, la zona de estudio está comprendida en los términos municipales de Llano de Olmedo, Villeguillo, Ciruelos de Coca, Villagonzalo de Coca, Coca y Santiuste de San Juan Bautista, (sector oeste de la provincia de Segovia y sector sureste de la provincia de Valladolid).

Desde el punto de vista medioambiental, especialmente considerando los humedales, la zona de estudio ha debido ser ampliada, abarcando el sector meridional oriental del Complejo de humedales de *Coca-Olmedo* (Rey Benayas, 1991). Este hecho está motivado porque los procesos condicionantes de su formación operan a una escala regional, como son los flujos profundos de aguas subterráneas. También por la conectividad de los humedales, de modo que, de perfilarse la técnica de la recarga de acuíferos como una metodología válida para la recuperación de humedales degradados, esta podría aplicarse en numerosos humedales del *Complejo*.

En el Bloque 2 se presenta una serie aportaciones al conocimiento, de escasa componente bibliográfica, basada en la toma de datos directos y su interpretación.

Las posibilidades de extrapolación a escenarios análogos, nos ha llevado a considerar la zona de estudio un “*laboratorio experimental*.” Este atributo es debido a la alta disponibilidad de datos en un territorio tan reducido, y a tratarse de un sistema relativamente cerrado para algunos procesos, lo que posibilita estudiar su seguimiento y evolución, como puede ser la hidroquímica de las aguas subterráneas o de los humedales involucrados en el funcionamiento del sistema.

En este apartado se presentan las principales características de la zona, extraídas de los antecedentes consultados, postergando para el bloque 3 las aportaciones al conocimiento basadas en cuatro años de toma de datos y su posterior interpretación, y en el estudio de la evolución del sistema, tras el primer año de operatividad de las instalaciones de recarga artificial.

En las Figs. 1.56 y 1.57 se presenta la situación geográfica de la zona sobre la cartografía del Servicio Geográfico del Ejército, a escala aproximada de 1:250.000 y 1:150.000.

La **fisiografía** de la *Cubeta* a escala intermedia se presenta en las Figs. 1.58 y 1.59, que corresponden al Modelo Digital del Terreno (en adelante MDT) con paso de malla de 100 m y un factor de realce en la vertical de 10x.

Para disponer de una escala más detallada, se han elaborado dos bloques diagrama a partir de un MDT de precisión métrica. El primero es un bloque diagrama de “*alambre*” para apreciar la fisiografía de la zona de estudio (Fig. 1.60.) y variaciones en el relieve, y el

¹² Este efecto es el producido entre los usuarios de aguas subterráneas (principalmente agricultores), al ver las importantes ventajas y beneficios económicos obtenidos por otros usuarios de aguas subterráneas, con costes asequibles (Llamas *et al*, 2001).

segundo un bloque diagrama en 2,5 D como herramienta adicional para la apreciación de detalles fisiográficos (Fig. 1.61.). Ambos han sido elaborados empleando la aplicación informática *Surfer 8.0*.

En ambas figuras se puede detectar que existe un nuevo afloramiento de margas de las facies Cuestas en el sector sur de la *Cubeta*. Presenta carácter lineal y orientación aproximada NNO-SSE. Este divide a su vez el acuífero en dos *ramales*, incomunicados en algunos sectores, ya que las margas terciarias son de baja permeabilidad.

La altitud es descendente a medida que avanza hacia el norte, donde aparece una artesa, plana o *Cubeta*, salpicada de humedales y antigua zona de rebosamiento del acuífero. La cota queda comprendida entre las cotas 729 y 817 m.s.n.m. para la zona de *Cubeta* propiamente dicha, según se deduce del tratamiento GIS del MDT de un metro de precisión de la Junta de Castilla y León del año 2000.

Para la totalidad del MDT representado, las cotas oscilan entre los 722 y 902 m, desde la zona del talveg de los ríos a la cima de las colinas situadas al suroeste.

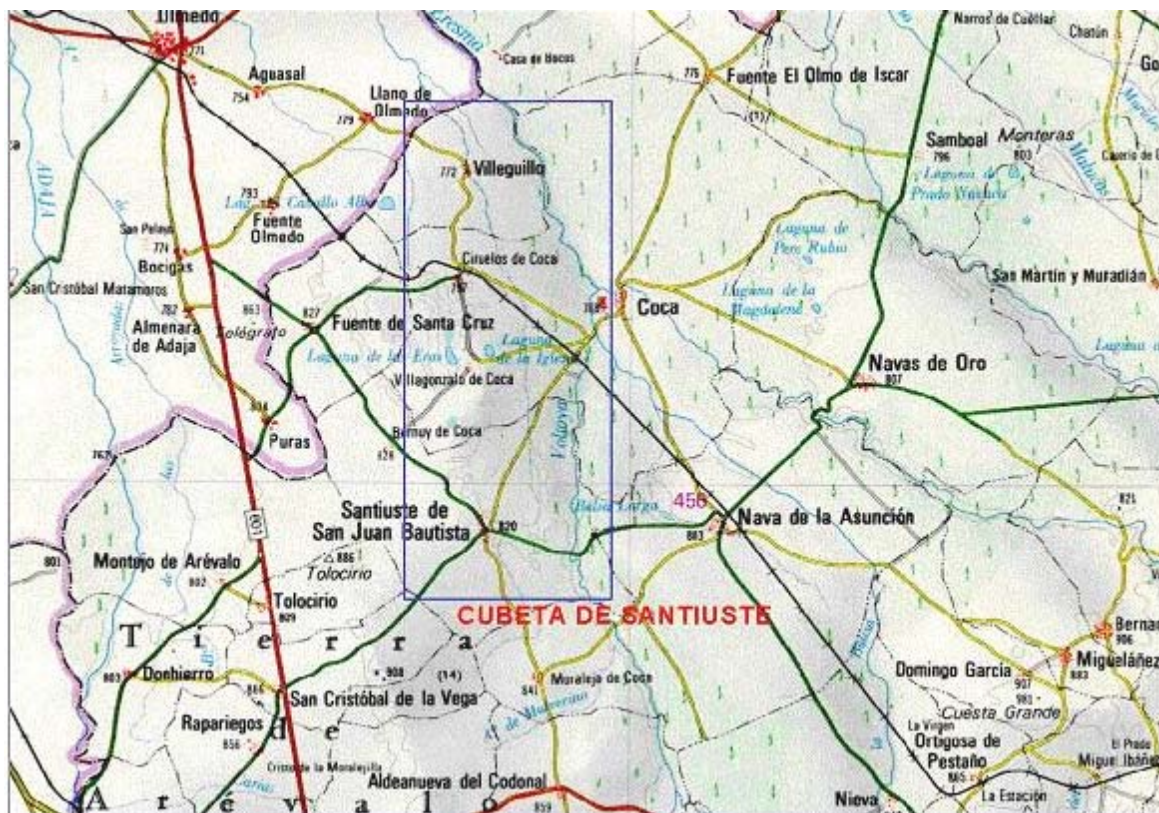


Fig. 1.57. Situación geográfica de la zona sobre la cartografía militar del SGE. Escala aproximada 1:150.000.

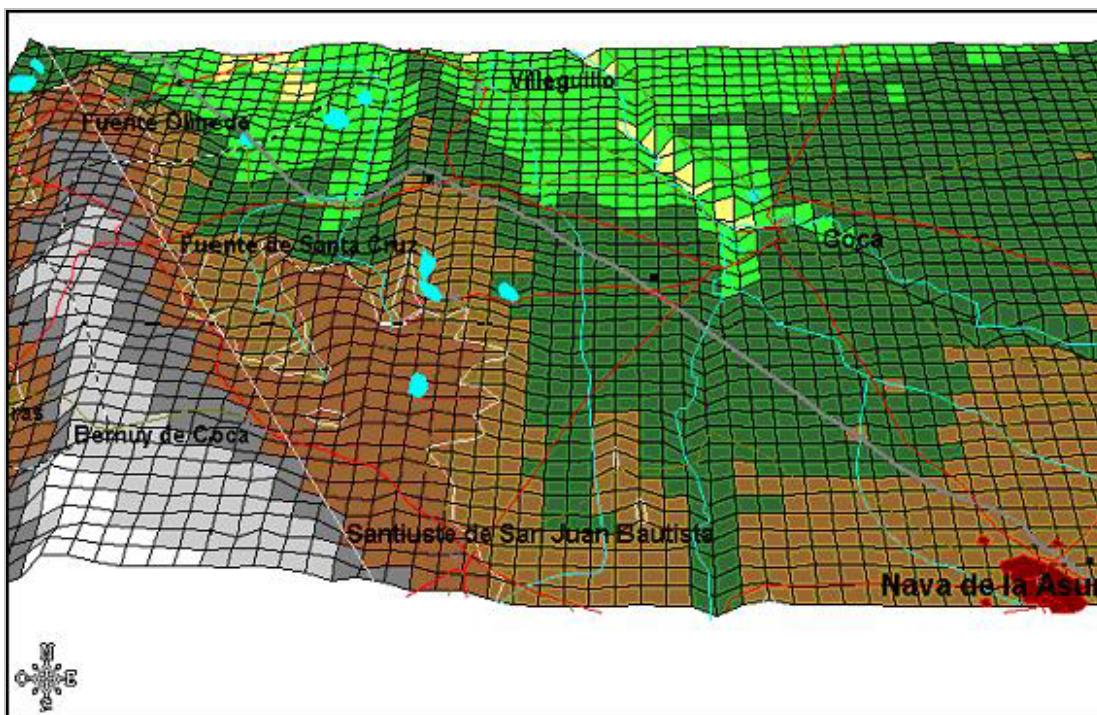


Fig. 1.58. Bloque diagrama elaborado con el modelo digital del terreno con paso de malla de 100 m y un factor de realce en la vertical de 10 para la apreciación, a grandes rasgos, de la fisiografía e hidrografía. Obsérvese que la zona está salpicada de abundantes bodones o lavajos, si bien la mayoría están desecados en la actualidad.

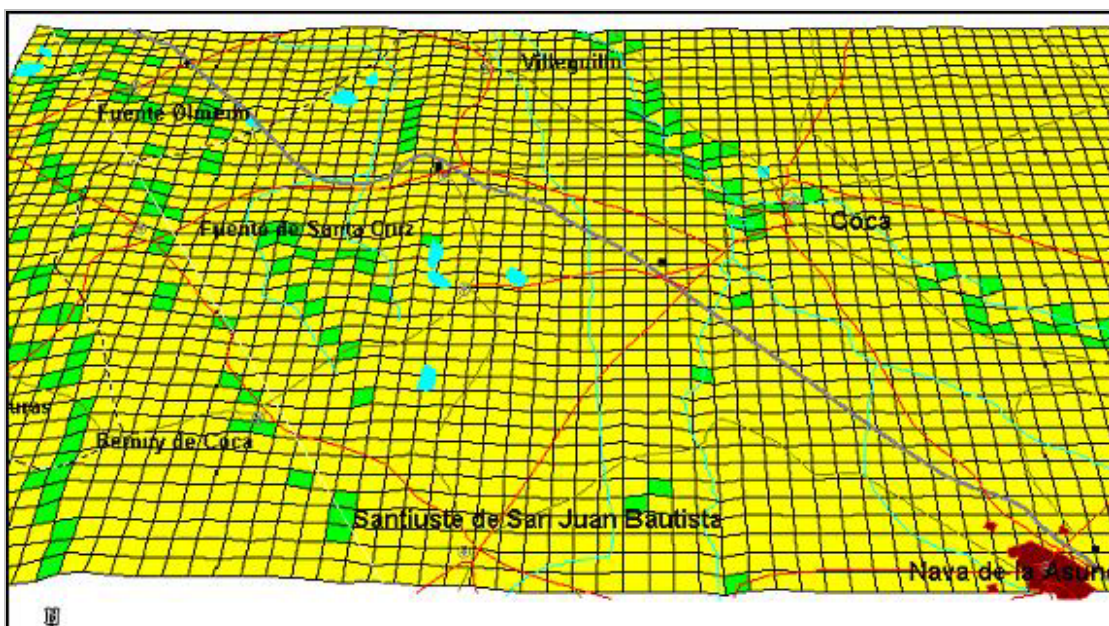


Fig. 1.59. Modelo digital del terreno superpuesto a una cobertura de pendientes con paso de malla de 100 m y un factor de realce en la vertical de 10 para la apreciación de las pendientes de la zona (en MAPA, 1999).

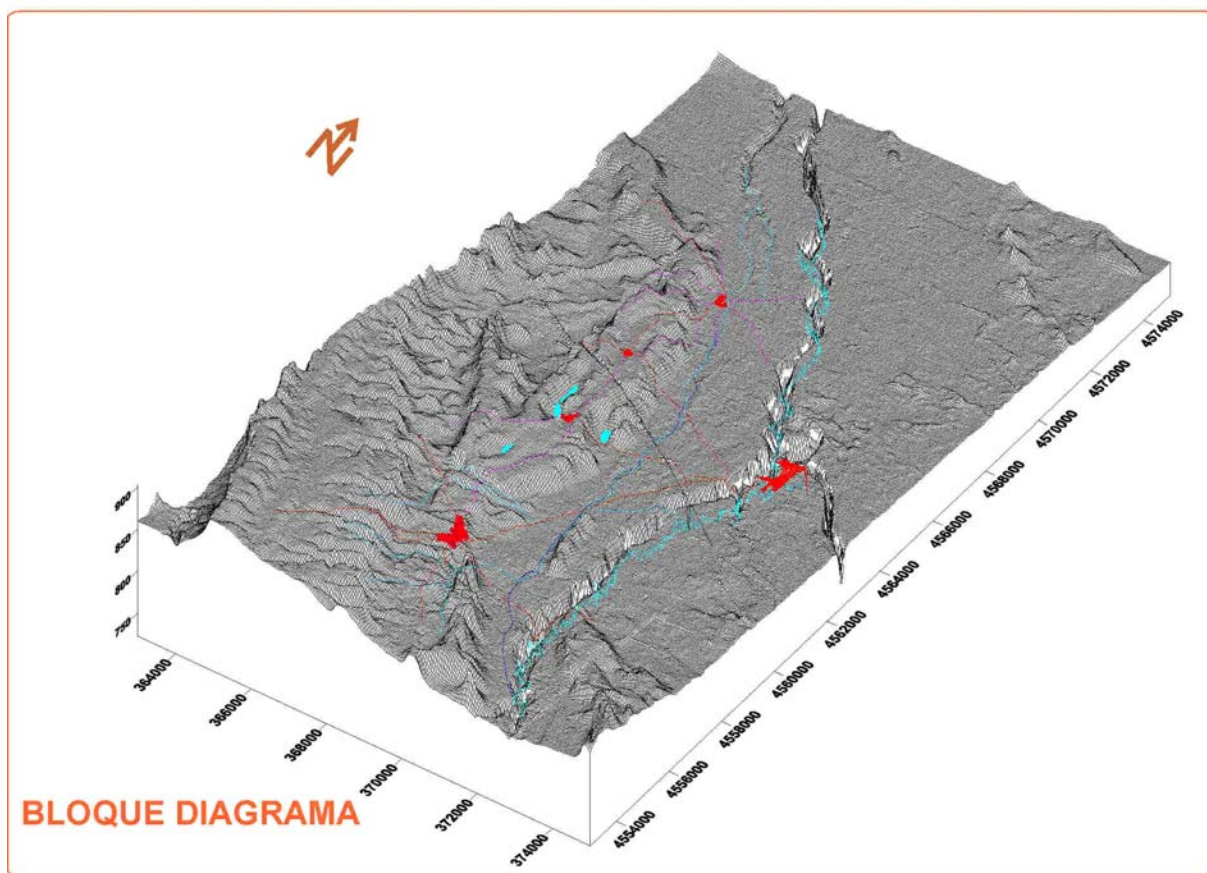


Fig. 1.60. Bloque diagrama de alambre o wireframe que refleja la fisiografía de la Cubeta.

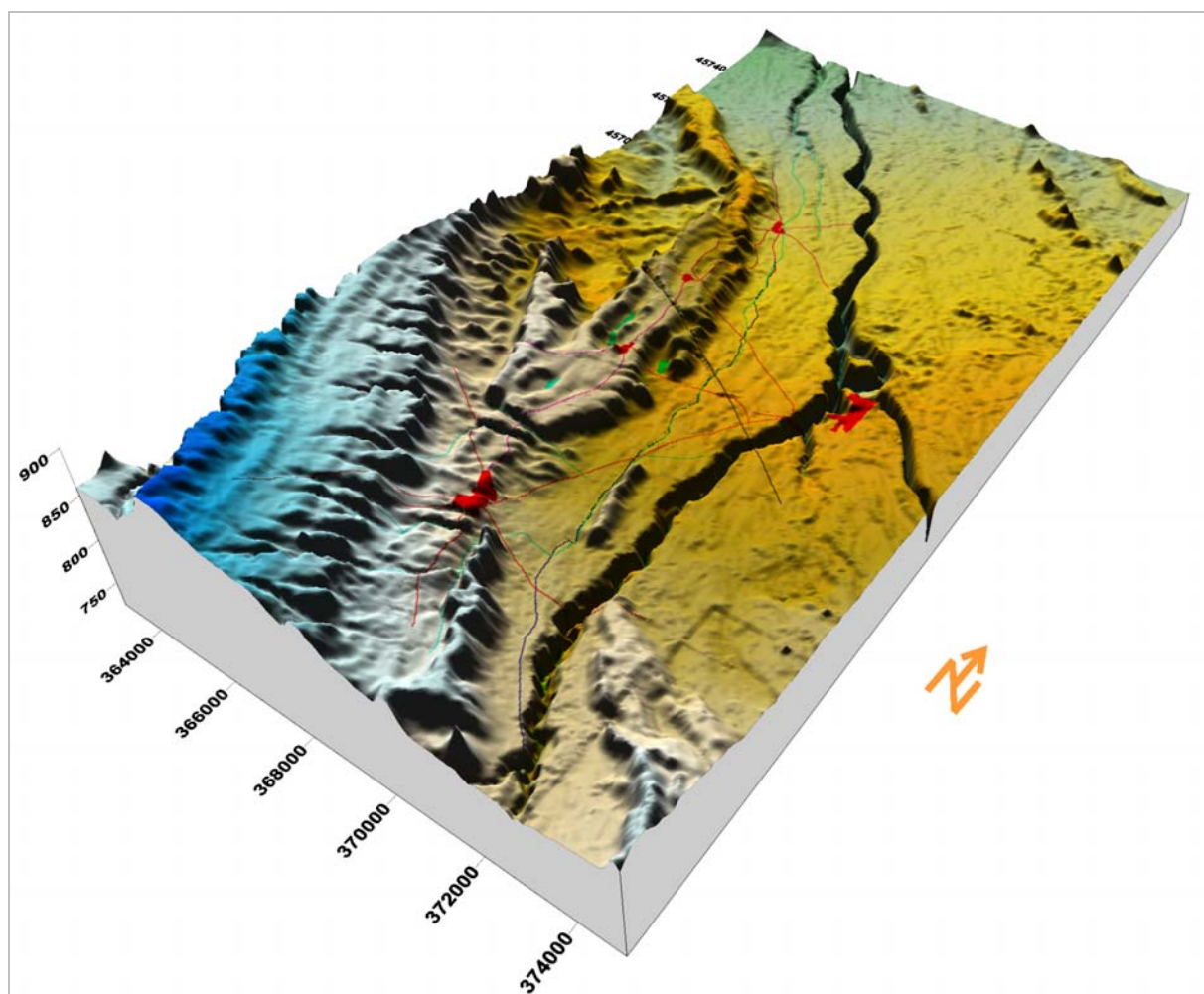


Fig. 1.61. Bloque diagrama ráster que refleja la fisiografía de la zona de estudio elaborado a partir del MDT. La Cubeta queda comprendida entre los cauces fluviales y los afloramientos terciarios (colinas). Los principales pueblos, de sur a norte, son: Santiuste de San J&B, Coca y Villeguillo.

Climáticamente, la zona de estudio está incluida en la provincia Carpetano-Ibérico-Leonesa de la región mediterránea, sector Guadarrámico.

La bibliografía consultada indica que se ha realizado un estudio climático con datos tomados en la estación de Seguro de Coca durante 45 años. El tratamiento de estos datos desprende unos resultados que indican que la temperatura media en la zona oscila entre 10° y 12° C, con mínimas de 2 a 4° C y media de las máximas en torno a 20-22°C. La oscilación térmica media anual es superior a los 30° C (claro indicio de continentalidad), con sólo cinco meses libres de heladas (de junio a septiembre, ambos incluidos). Los valores termométricos máximos se sitúan en verano cerca de 40° C, mientras que los mínimos pueden llegar a ser inferiores a los -12 ° C, con el mes de enero con *helada segura*.

La pluviometría ronda los 600 mm y presenta una distribución irregular en la zona, ligeramente mayor en el norte que en el sur. La evapotranspiración media anual ronda los 700 mm. El período de estiaje dura entre 4 y 5 meses con un déficit medio mensual de entre 250 y 350 mm.. A partir de estas características el clima queda definido como *Mediterráneo Seco*. (MAPA, 1999b).

Con respecto a los mapas de **series de vegetación** de España a escala 1:1.000.000, queda situada en una comarca de clima mediterráneo genuino, moderadamente cálido, seco y de inviernos secos (Rivas, 1986).

Desde el punto de vista **agroclimático**, los inviernos son de tipo avena o trigo-avena y el verano de maíz. Estas condiciones permiten establecer cultivos cerealistas para grano de invierno y primavera, leguminosas para grano en siembra otoñal o primaveral, tubérculos, cultivos industriales, forrajeros, hortalizas de hoja o tallo, de fruto, de flor, raíces o bulbo, frutales de pepita o hueso, de fruto seco, vid, etc., con más o menos limitaciones.

La **red hidrográfica** principal de la zona de estudio delimitada está constituida por la confluencia del arroyo Balisa con el Voltoya (a unos 1.000 m al SO del municipio de Coca), y la confluencia del río Eresma con el Voltoya a unos 500 m hacia el NNO de Coca. Los principales cauces presentan trazados sinuosos y carácter meandriforme, con elevado índice de sinuosidad (MAPA, 1999b), al discurrir por una zona de escasa pendiente. A este respecto cabe subrayar que los tramos de orientación NE-SO son más rectilíneos, aparentemente por condicionantes tectónicos (estudiados en el bloque 2).

Los ríos son ganadores, recibiendo parte del drenaje del acuífero, al ir encajados sobre el sustrato impermeable de las margas de las Facies Cuestas. En situaciones de crecidas extraordinarias su funcionamiento es influente, es decir, ceden aguas al acuífero en zonas puntuales, como se ha constatado en la cartografía hidrogeológica para la situación de febrero de 2003, en una situación anormalmente húmeda y durante las operaciones de recarga artificial (MAPA, 2003).

Atravesando la Cubeta de Santiuste, de sur a norte, se identifica el trazado del Arroyo de la Ermita, totalmente seco por efecto de la explotación intensiva del acuífero superficial. Su antiguo trazado ha sido empleado para el diseño del canal de recarga artificial, con el que coincide en un 30 % de su longitud, garantizando una cota descendente en todo su trayecto (MAPA, 1999c).

Independientemente de su estado actual o su estacionalidad, la toponimia denota un extenso sistema de **humedales** más o menos someros extendidos por la zona de estudio del Complejo Coca-Olmedo, especialmente en la margen oeste, entre los que cabe destacar La Laguna de la Iglesia, de las Eras, Valderruedas, de Ciruelos, Alba, Valdeperillán, como humedales con cierto grado de preservación.

Geomorfológicamente, se trata de una superficie poligénica, caracteriza por la existencia de una formación arenosa cuaternaria de un antiguo sistema dunar (*Unidad Arévalo*), cuyas arenas eólicas han colmatado una paleoforma compleja excavada en un sustrato Terciario, de naturaleza arcillosa (*Facies Cuestas*) o areno-arcillosa (*Facies Puente Runel*).

En el apartado previo fueron descritas la edad y características de los litosomas presentes en el acuífero de los Arenales, que coinciden, a *grosso modo*, con las facies de la zona de estudio. Estas formaciones son descritas brevemente a continuación, ampliando la información presentada en el apartado previo.

La edad de los materiales presentes en la *Cubeta* se divide en Terciario y Cuaternario.

Los materiales pertenecientes al Terciario, de edad miocena, afloran a lo largo de los escarpes de los ríos Eresma y Voltoya, al E de la zona, así como en su extremo NO. Su potencia total llega a alcanzar los 70 m, y presenta dos tipos de facies bien definidas:

- Facies detríticas: constituidas por fangos arcósicos con intercalaciones de arcosas finas a gruesas y arenas, principalmente representadas por las Facies Puente Runel y Facies Pedraja del Portillo.
- Facies de carácter margo-arcilloso: corresponden a depósitos de transición hacia las químicas del centro de la Cuenca del Duero, principalmente representadas por las Facies Cuestas.

Los materiales cuaternarios alcanzan espesores considerables, y es en ellos donde se desarrolla el acuífero superficial de la Cubeta de Santiuste. La formación más importante está representada por la unidad Arévalo, que puede alcanzar un espesor superior a 40 m. Esta unidad da origen a la superficie morfológica de Coca-Arévalo, constituida por depósitos arenosos de origen fluvial, parcialmente recubierta por depósitos eólicos y de áreas endorreicas. Así mismo, es de destacar los depósitos de terraza del sistema Adaja-Eresma-Voltoya que originan un conjunto de terrazas escalonadas cuaternarias, que descienden hacia el este flanqueando los depósitos de la *Unidad Arévalo*.

Existen dos hipótesis básicas acerca del área madre de los sedimentos de la *Cubeta*: las arenas proceden de la denudación de las rocas plutónicas y metamórficas del Sistema Central, o bien del macizo metamórfico de Santa María la Real de Nieva. La procedencia resulta bastante importante, dado que es el principal condicionante de la composición **geoquímica del acuífero**, y por ende, de sus aguas. En el bloque 3 se estudia el origen de los materiales.

En cuanto a la **hidrología subterránea**, la profundidad del nivel freático oscila entre escasos centímetros (*Puente de los Navazos*) y aproximadamente 15 metros (*Pinar de Ciruelos*) para captaciones perforadas en el acuífero superficial. Esta variación, de fuerte componente topográfica, está además condicionada por el espesor de las arenas que

constituyen el acuífero eólico superficial, y por la explotación antrópica del mismo, siendo en las zonas de mayor explotación agraria donde se producen los máximos descensos.

La proximidad del nivel del agua a la superficie, refleja la capacidad de almacén útil y de regeneración de zonas húmedas, así como el desarrollo de especies vegetales específicas, dependiendo de su capacidad de soportar encharcamiento y sequedad edáfica.

La **composición química del agua** es consecuencia de las características intrínsecas del acuífero y de las aguas nativas. De este modo, en el sector Oeste predominan facies sulfatadas y cloruradas indicadores de condiciones salobres, y en el centro de la *Cubeta* y ramal Este las bicarbonatadas cálcicas. A estas hay que añadir la influencia de procesos contaminantes, tanto naturales como antrópicos, y tanto puntuales como difusos.

Las características hidrogeológicas del sistema, la calidad de sus aguas y el estado de los humedales son analizados con detalle, respectivamente, en los bloques 2, 3 y 4 de este proyecto de investigación.

5.4. LA COMUNIDAD DE VILLA Y TIERRA DE COCA

En este apartado se muestran algunas pinceladas de la historia reciente de las principales localidades comprendidas en la Cubeta de Santiuste. Aunque *a priori* pueda parecer alejado de los objetivos del estudio, conviene recordar que “se conoce un territorio cuando se conocen sus gentes.”

La “*Comunidad de Villa y Tierra de Coca*” tiene su origen en el siglo XI, bajo el mandato de Alfonso VI, cuando Coca se encarga de organizar jurídica, administrativa y militarmente el territorio circundante después de que la zona fuera reconquistada a los musulmanes.

Durante los siglos XII y XIII surgen los Concejos de Villa y Tierra y, posiblemente, a raíz de las asambleas vecinales que tenían lugar en los núcleos rurales con objeto de tratar los asuntos comunes y organizar la defensa de los bienes colectivos de la villa y aldeas.

Coca, a lo largo de estos tres siglos, fue el centro y cabeza de todos los pueblos.

En el siglo XIII, la Comunidad estaba formada por 17 poblaciones y ocupaba un territorio aproximado de 300 kilómetros cuadrados, siendo Coca la capital del Concejo, depositario del poder real, y quedando el resto de las aldeas supeditadas a su autoridad. No se conoce el fuero real otorgado, aunque la mayor parte de la tierra pertenecía a este Concejo. Más tarde y, poco a poco, el resto de las aldeas fueron conquistando algunos derechos.

En 1773 las poblaciones de Nava de Coca y Santiuste de Coca cambian su nombre por el de Nava de la Asunción y Santiuste de San Juan Bautista. Tras la invasión napoleónica, todos los pueblos de la Comunidad comenzaron a apropiarse de terrenos que eran comunes, lo que dio lugar al inicio de su decadencia, viviendo episodios de enfrentamientos entre las distintas aldeas y entre comunidades vecinas. Posteriormente, durante las desamortizaciones del siglo XIX, se van a ver afectados la mayor parte de los bienes patrimoniales, sobre todo las zonas de pasto y tierras de labor.

Actualmente la Comunidad está formada por nueve poblaciones: Coca, sobre cuyo alcalde recae la presidencia, Fuente de Santa Cruz, Moraleja de Coca, Navas de Oro, Nava de la Asunción, Santiuste de San Juan Bautista, Villagonzalo de Coca, Villeguillo y Ciruelos de Coca. Tiene una entidad jurídica propia y es propietaria de una gran masa forestal de pinares. Los beneficios del pinar se emplean para dar distintos servicios a los pueblos que la constituyen: limpieza, extinción de incendios, reparación de caminos, recogida de materiales reciclables (papel y pilas)...

5.4.1. Las poblaciones

- **Villeguillo**

Localidad de 160 habitantes situada a 60 Km al NO de Segovia, cerca de Coca, junto al límite de la provincia de Valladolid. En 1247 se llamaba Vellaguiello; pero, al menos desde el siglo XVI, ya se nombra como en la actualidad. Atraviesa su término, pasando por el lado oeste a escasa distancia de la población, el río Eresma.



- **Ciruelos de Coca**

Tanto en 1247 como en 1591 aparece citado como Çiruelos, añadiéndose en el siglo XIX el sufijo. Su nombre se debe probablemente a la numerosa presencia, tiempo atrás, de este árbol frutal en la zona. Pertenece al Ayuntamiento de Coca, del que dista 6 Km. El río Voltoya atraviesa el término municipal por el Este. Su población actual ronda los 120 habitantes.

- **Coca**

Situada entre las cuencas de los ríos Eresma y Voltoya, que la bañan por el norte y el sur respectivamente. Su nombre original era Cauca, capital de la tribu celtíbera de los vacceos. Asediada y destruida por el cónsul romano Licinio Lúculo en el año 148 a.C. En ella nació el emperador Teodosio “El Grande”, en el año 346. Más tarde fue repoblada en el año 1093 por el conde Pedro Ansúrez. También llegó a ser capital de la Comunidad de Villa y Tierra que lleva su nombre. A su ayuntamiento se han agregado Ciruelos de Coca y Villagonzalo de Coca. La población censada en de 2017 habitantes.

- **Villagonzalo de Coca**

En 1247 se denomina Villa Gonçalvo; en 1591, Villagonçalo, aludiendo a su repoblador; y, en el siglo XX, se le ha añadido “de Coca.”

Pertenece al municipio de Coca, del que se halla a 6 Km de distancia al SO. Habitan en torno a 210 habitantes

- **Bernuy de Coca**

Ubicado a 4 Km al NO de Santiuste de San Juan Bautista, a cuyo Ayuntamiento pertenece. En 1247 se cita tan sólo como Bernuy. Se añadió el sufijo “de Coca” a mediados del siglo XIX. Esta poblado por unos 180 habitantes.

- **Santiuste de San Juan Bautista**

Situada a 50 Km al NO de Segovia, entre Nava de la Asunción y Bernuy de Coca. En el siglo XIII se llamaba Sant Yuste, nombre que mantuvo hasta mediados del siglo XIX, cuando se añadió el sufijo de San Juan Bautista. Su término está incluido en el territorio de la Denominación de Origen Rueda, única comarca vinícola de la región que elabora sólo con variedades de uva blanca, siendo la principal la “verdejo.” Cuenta con 200 habitantes censados.

Los datos complementarios como pueden ser los relativos a su demografía, patrimonio cultural y puntos de interés se presentan en el anexo 1.2.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL BLOQUE 1

A partir de los distintos apartados del Bloque 1, contextualización y definición de las condiciones de referencia, se han extraído como conclusiones:

La recarga artificial de acuíferos (AR o MAR)

La **recarga artificial de acuíferos** es una técnica concebida para la infiltración de agua en los acuíferos moderna, efectiva y barata con respecto a las grandes obras hidráulicas. En España se trata de una técnica todavía incipiente, escasamente considerada por la administración hidráulica del país.

Algunas de las **ventajas de la recarga artificial (AR)** son el incremento de las reservas en los acuíferos, la facilidad para el transporte de agua en ellos, la mejora cualitativa, la reducción de costes de bombeo y la retención de la intrusión marina.

El escaso tratamiento de esta técnica está motivado, en gran medida, por el desconocimiento de su potencial, la visión principalmente hidráulica de la política relativa a la gestión de los recursos hídricos en el país, la escasez y falta de continuidad en las experiencias realizadas hasta la fecha y la escasa divulgación en los medios de comunicación y en las aulas. En este contexto, resulta procedente la difusión de experiencias e investigaciones con rigor científico.

Para presentar el “**Estado de la cuestión**” o fondo teórico y procedimental asociado a las operaciones de recarga artificial de acuíferos, se han desarrollado cuatro apartados:

- Breve repaso a las instalaciones de AR y la expansión de esta técnica en España, Europa y en el resto del mundo.
- Exposición de los distintos sistemas de AR existentes.
- Descripción del mecanismo de colmatación, dado su protagonismo como impacto ambiental en las operaciones e instalaciones de AR.

En **España**, las principales experiencias han sido desarrolladas en Cataluña por iniciativa autonómica, las experiencias piloto diseminadas por nuestra geografía, promovidas por el IGME y actividades puntuales desarrolladas en el Este peninsular. Hasta el año 2002 no han comenzado actividades de gran envergadura, promovidas por el MAPA en la provincia de Segovia.

El volumen medio de recursos hídricos resultantes de operaciones de AR en el estado español asciende a 300-350 hm³/año, cifra muy baja con respecto a otros países como Holanda, Alemania, USA, Australia, etc., donde el volumen medio proporcional sobrepasa en más de diez veces esta cifra.

De entre todas las **opciones de recarga artificial de acuíferos** (recarga directa, indirecta, localizada, realizada o inducida), bien sea a través de sistemas superficiales o profundos, con todas sus posibles variaciones y dispositivos, y técnicas auxiliares, como la de almacenamiento y recuperación de los acuíferos, *Aquifer Storage & Recovery* (ASR) o

Filtración por el lecho del río, *River Bank Filtration* (RBF), no se puede considerar ninguna como la más apropiada. Su elección dependerá de las características de la zona, tales como propiedades de la ZNS, volumen retenido en la zona vadosa, geometría del acuífero, naturaleza del sustrato, presencia de niveles confinantes, temperatura del agua, etc. Todas las opciones presentan ventajas e inconvenientes, y en todos los casos hay impactos ambientales asociados.

La **recuperación de humedales mediante AR** debe contemplar la posición de las masas de agua con respecto a los sistemas de flujo y las características del área de descarga.

El estudio de las operaciones de AR y su influencia en la cantidad de las aguas, calidad, y recuperación de espacios naturales degradados, requiere un análisis riguroso de la documentación existente, estudiar el marco legal, el empleo de herramientas GIS y de modelos de simulación tanto de cantidad como de calidad, así como técnicas de escenarios análogos, con constante atención a las mejoras técnicas disponibles que surjan en la comunidad científica y técnica.

En definitiva, aunque la elección del método de AR depende de cada situación concreta, hay algunos criterios comunes.

La importancia de la colmatación

Entre los impactos que afectan a las estructuras de recarga, existe quórum en todos los autores consultados acerca del más lesivo, que es la **colmatación**. Este proceso representa el principal inconveniente e impacto que afecta a las estructuras de AR y a la actividad en sí. Se trata de un complejo fenómeno resultado de la asociación de factores físicos, químicos, biológicos, agravados por el entrapamiento de gases en el acuífero y su compactación, cuya influencia puede ser acumulativa y sinérgica. Como un impacto ambiental que es, su tratamiento debe ser realizado con técnicas de ingeniería medioambiental, para su previsión de generación, cuantificación y modelización.

Contextualización. Marco legal y antecedentes técnicos

En el apartado de “**contextualización**”, se han presentado las características principales de la zona de estudio, diferenciando aquellos aspectos descriptivos, obtenidos del análisis lo más exhaustivo posible de los antecedentes, de los resultados de la toma de datos y su interpretación (incluidos en el Bloque 2, *Aportaciones al conocimiento*).

El estudio que se plantea requiere una actualización de los datos disponibles, y toma de nuevos datos durante las operaciones de recarga artificial, lo que contribuye a incrementar el conocimiento del sistema.

En este contexto, como etapa preliminar, se ha realizado un análisis crítico de los antecedentes, tanto desde un punto de vista legal como técnico, y valorado qué aspectos requieren mayor atención por no haber sido abordados en estudios previos.

Como análisis “legalista”, se ha realizado un **análisis léxico-gráfico** con objeto de comprobar qué grado de atención recibe la técnica por parte de la Administración. En las

principales disposiciones legales apenas aparece el término “recarga artificial” o “zonas húmedas/humedal.” En el Plan Nacional de Regadíos (PNR) no hay alusiones; en la Ley 6/2001, de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) contempla 2 veces la “*recarga de acuíferos superficiales o profundos*” y 8 veces el término “humedal”; el RD 606/2003, del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) menciona el término recarga artificial 1 vez; la Ley de Aguas (LA) 28/85 menciona la recarga artificial una vez y las zonas húmedas 6 veces; la *nueva LA* 46/1999, menciona recarga artificial 1 vez, zonas húmedas 2 veces y humedal 0 veces, la *DM* 2000/60/CE, cita 3 veces la palabra recarga artificial y 4 veces la palabra humedal; el Plan hidrológico Nacional (PHN), Ley 10/2001, (derogada recientemente), no menciona la recarga artificial salvo en los listados de inversiones, el término humedal aparece 5 veces y zonas húmedas 0 veces; el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (PHD), RD 1664/98 tiene tres citas al término *AR*, y 8 alusiones en tablas de inversiones, siendo la disposición con mayor densidad del término “recarga artificial” por número de páginas en su articulado, consideradas “*técnicas especiales*”, seguido de la Directiva Marco (DM) (todavía sin trasponer a la legislación española). Se trata además del Plan Hidrológico de Cuenca (PHD) que más atención dedica a la *AR*, seguido del de la cuenca del Ebro.

En conclusión, se ha detectado que las consideraciones hacia la recarga artificial *AR* y la conservación de las zonas húmedas son escasas, si bien queda bien definido el escenario de actuación. También se aclara que la recarga artificial es un vertido, en sentido amplio.

Contextualización. Presentación de la zona de estudio

La **presentación de la zona de estudio** se ha realizado a dos escalas. Por un lado se presenta el acuífero en que está integrada a escala regional, Los Arenales, Unidad Hidrogeológica 02-17. Más tarde se procede a la descripción de la zona de estudio a escala local, con especial atención a su fisiografía, geología y funcionamiento hidrogeológico.

Las características de la zona de estudio, su delimitación física y la alta disponibilidad de datos ha propiciado que sea considerada un “*laboratorio experimental*”, en el que obtener conclusiones que resulten extrapolables a escenarios análogos.

Los **límites** de la zona de estudio han sido redimensionados según los objetivos previstos. De este modo, el acuífero superficial donde se concentra la mayoría de la investigación presenta una superficie de 42,19 km², mientras que la zona donde se pretenden aplicar los objetivos medioambientales se extiende al complejo de humedales de *Coca-Olmedo*.

En este bloque se ha incluido además una presentación de las condiciones de referencia, distinguiendo este término para los aspectos hidrogeológicos, del “entorno preoperacional”, utilizado para los objetivos medioambientales, de acuerdo con las menciones presentadas en la legislación.

En cuanto al medio antrópico se ha presentado la zona de estudio desplegando algunos hechos históricos, sociopolíticos y demográficos. A este respecto sobresale la disminución de la población rural durante los períodos de sequía de gran duración que ha habido en la década de 1980 a 1990.

Para completar el apartado, se presentan las siguientes premisas que soportan la mayoría del proyecto de investigación:

- La recarga artificial de acuíferos es una técnica que permite el desarrollo socioeconómico de zonas sometidas a una fuerte explotación de aguas subterráneas y la recuperación de enclaves degradados.
- Su efecto sobre los acuíferos y la sociedad puede resultar beneficioso o no, dependiendo de las pautas de gestión, de la calidad de las aguas resultantes y de la interacción entre la recarga y los factores sociales y medioambientales.
- Su efecto beneficioso requiere un hilo argumental lógico sobre el que subyazca una metodología técnicamente correcta, robusta y viable en cuanto a su aplicación.
- Es preciso presentar estas técnicas en las aulas y a la población en general, sembrando así la semilla que germinará a medio o largo plazo, cuando los jóvenes actuales sean los gestores hídricos del futuro.

BLOQUE

2



CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

*5.6. Uso sostenible y mantenimiento de la alta calidad de los recursos hídricos:
Objetivo: Alcanzar unos niveles de calidad del agua que no den lugar a repercusiones ni riesgos inaceptables para la salud de las personas y el medio ambiente, y hacer lo necesario para que el ritmo de explotación de los recursos hídricos sea sostenible a largo plazo.*

Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente:
“Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos”



ÍNDICE DEL BLOQUE 2

MEMORIA

	Págs.
ÍNDICE DEL BLOQUE 2	165
ÍNDICE DE FIGURAS	167
ÍNDICE DE TABLAS	169
BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO.....	171
1. INTRODUCCIÓN	171
1.1. OBJETIVOS	171
2. HILO CONDUCTOR.....	172
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	174
4. MARCO TEÓRICO	177
4.1. PROCEDIMIENTOS DE INTERPOLACIÓN	177
5. GEOLOGÍA DE LA CUBETA DE SANTIUSTE.....	180
5.1. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA.....	180
5.2. DISPOSICIÓN DE LOS SEDIMENTOS CUATERNARIOS.....	185
5.3. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL SISTEMA	190
5.3.1. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS	192
5.3.1.1. ESTUDIO DE LINEAMIENTOS POR TELEDETECCIÓN	193
5.3.1.2. ESTUDIO DE LINEAMIENTOS POR FOTOINTERPRETACIÓN	193
5.3.2. ESTUDIO DE LAS DERIVADAS DIRECCIONALES DEL MAPA DE PENDIENTES DEL PALEORRELIEVE....	193
5.3.2.1. RESULTADOS.....	194
5.3.3. ESTUDIO DE ESTRUCTURAS MENORES E INVESTIGACIÓN DE ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA	196
5.3.4. DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES DIRECCIONES DE DISCONTINUIDAD ESTRUCTURAL	203
5.4. RASGOS GEOMORFOLÓGICOS INDICATIVOS DE ACTIVIDAD TECTÓNICA	206
5.4.1. CRITERIOS INFORMATIVOS SOBRE LAS TASAS DE MOVIMIENTO.....	207
5.4.2. CRITERIOS INDICADORES DE LA EXISTENCIA DE ACTIVIDAD.....	207
5.4.3. CRITERIOS PARA RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA TECTÓNICA Y DEFORMACIÓN.....	208
5.4.3.1. ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS.....	208
5.4.3.2. ANOMALÍAS GEOMORFOLÓGICAS.....	217
5.5. GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO	226
5.6. CONCLUSIONES DEL APARTADO GEOLOGÍA.....	239
6. CLIMA	241
6.1. REVISIÓN DE LA RED METEOROLÓGICA.....	241
6.2. ESTUDIO DE LAS SERIES DE DATOS	241
6.3. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS POR EL MÉTODO DE THORNTHWAITE.....	241
6.3.1. LLUVIA ÚTIL.....	244
7. HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE	246
7.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL RÍO VOLTOYA	246
7.2. CIRCULACIÓN Y DESCARGA EN LOS RÍOS VOLTOYA Y ERESMA.....	251
7.2.1. AFOROS SECUENCIALES DE LOS RÍOS VOLTOYA Y ERESMA.....	251
8. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. CONTRIBUCIONES	253
AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL MEDIO	253
8.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	253
8.1.1. POZOS	254
8.1.2. SONDEOS.....	254
8.1.3. MANANTIALES	255
8.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACUÍFEROS	257
8.2.1. HIDROESTRATIGRAFÍA	257
8.2.1.1. ACUÍFERO SUPERFICIAL	257



8.2.1.2.	ACUÍFERO INTERMEDIO	260
8.2.1.3.	ACUÍFERO PROFUNDO	260
8.2.2.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS	260
8.2.2.1.	ACUÍFERO SUPERFICIAL	260
8.2.2.2.	ACUÍFERO INTERMEDIO	266
8.2.2.3.	ACUÍFERO PROFUNDO	266
8.3.	CARTOGRAFÍAS HIDROGEOLÓGICAS	267
8.3.1.	RED DE CONTROL DE LA PIEZOMETRÍA	267
8.3.2.	ACUÍFERO SUPERFICIAL	268
8.3.2.1.	ELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN AUTOMÁTICA	280
8.3.3.	ACUÍFERO PROFUNDO	281
8.4.	PERFILES HIDROGEOLÓGICOS	289
8.5.	RELACIONES RÍO-ACUÍFERO	290
8.5.1.	ESTUDIO DE LA MORFOLOGÍA DEL ACUÍFERO Y SU DRENAJE NATURAL	290
8.5.1.1.	DRENAJE NATURAL POR LA MARGEN IZQUIERDA	292
8.5.1.2.	DRENAJE NATURAL POR LA MARGEN DERECHA	295
8.5.2.	ESTUDIO DE FUENTES Y MANANTIALES EN LOS TALUDES	295
9.	BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO SUPERFICIAL	298
9.1.	FUNDAMENTOS DEL BALANCE HÍDRICO	299
9.2.	BALANCES HÍDRICOS PREEXISTENTES PARA LAS SITUACIONES DE 1990 Y 1999	300
9.2.1.	RESUMEN DEL BALANCE HÍDRICO DEL IRYDA, 1990	300
9.2.2.	RESUMEN DEL BALANCE HÍDRICO DEL MAPA (1999)	301
9.3.	BALANCE HÍDRICO SECTORIZADO DE LA ZONA DE ESTUDIO	302
9.3.1.	EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	302
9.3.1.1.	ENTRADAS. AÑO HIDROLÓGICO 2002/03	303
9.3.1.2.	RECARGAS. APORTACIONES SUBTERRÁNEAS	308
9.3.1.3.	SALIDAS	310
9.3.1.4.	DESCARGAS (TRANSFERENCIAS SUBTERRÁNEAS)	312
9.3.2.	CIERRE DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUBETA DE SANTIUSTE PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2002/03	317
9.4.	CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN NATURAL	322
9.4.1.	ELECCIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA RECARGA MÁS IDÓNEO	322
10.	RECARGA ARTIFICIAL en la Cubeta de Santiuste	324
10.1.	DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO	324
10.2.	ESTABLECIMIENTO DE UNA RED DE CONTROL DE LA RECARGA (RCR)	327
10.3.	ANÁLISIS DE LA AR EN LA CUBETA DE SANTIUSTE PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2002/03	327
10.3.1.	MEMORIA DE LA AR DURANTE EL AÑO HIDROLÓGICO 2002/03	327
10.3.2.	EVALUACIÓN DE LA RECARGA EN EL AÑO HIDROLÓGICO 2002/03	333
10.3.3.	PROPUESTA Y ANÁLISIS DE MODALIDADES DE ESTIMACIÓN DE LA RECARGA A PARTIR DE LA TÉCNICA DE LA FLUCTUACIÓN DEL NIVEL DEL AGUA (WTF)	337
10.3.4.	EFFECTIVIDAD DEL PRIMER CICLO DE AR E INFLUENCIA DE FACTORES EXTERNOS	349
10.4.	INFORMACIÓN OBTENIDA DEL ESTUDIO DEL AVANCE DEL BULBO DE HUMIDIFICACIÓN	359
10.4.1.	PERFIL HIDROGEOLÓGICO A LO LARGO DEL CAZ	363
10.4.2.	RANGO DE VARIABILIDAD DE LA CAPA FREÁTICA	368
10.5.	FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ANTES Y DURANTE LA RECARGA ARTIFICIAL	374
10.5.1.	MODELO ANALÓGICO	379
11.	DIVISIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN UNIDADES HOMOGÉNEAS	386
12.	CONCLUSIONES DEL BLOQUE 2	392

ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
Fig. 2.01. Esquema argumental del Bloque 2: “Contribuciones al conocimiento del acuífero”.....	173
Fig. 2.02. Modelo de variograma típico. Fuente: Golden software, 2002.	178
Fig. 2.03. Mapa geológico de la zona de estudio (página siguiente).	180
Fig. 2.04. Bloque diagrama del Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio con una cobertura ráster sobrepuesta (página posterior).	180
Figs. 2.05 a y b. Estructuras sedimentarias típicas de sistema dunar (estratificación cruzada de bajo ángulo) localizadas en los taludes de los ríos Voltoya y Eresma en las localidades de Coca y Villeguillo respectivamente. Los sets confirman una dirección de progradación suroeste-noreste.	185
Fig. 2.06. Ejemplo de terrazas fosilizadas en la zona de estudio en la margen izquierda del río Voltoya, cerca del Molino del Quemao (Moraleja de Coca). Unidades Superior y Media.	188
Fig. 2.07. Ejemplo de terrazas fosilizadas en el talud del río Eresma, margen derecha. Inmediaciones de la Estación Saica de Villeguillo. Unidades Media e Inferior.	188
Figs. 2.08. a) b) y c). Ejemplo de canales de gravas de la Unidad Superior en el Arroyo de la Ermita, Dehesa Tetuán (Coca). Talud del caz de recarga artificial.	189
Fig. 2.09. Ejemplo de pliegue encontrado en la zona de estudio en el punto de coordenadas UTM: X=371560 ; Y= 4563164. Si bien podría tratarse de un pliegue sedimentológico o de disolución, su orientación coincide con las principales directrices tectónicas que han actuado sobre el sistema (descritas en el próximo apartado). Coordenadas obtenidas con GPS monofrecuencia.	191
Figs. 2.10. a) - c). Rosas de fracturación correspondientes a todos los lineamientos del sector septentrional, meridional y de toda la zona de estudio respectivamente.	195
Fig. 2.11. Croquis con la posición de las estaciones geomecánicas a escala 1:130.000 sobre la ortoimagen digital del año 2000.	197
Figs. 2.12 a) y b). Representación de la totalidad de los datos estructurales medidos en campo en falsillas equiareales de Schmidt. Arcos y polos.	198
Figs. 2.13 a) y b). Estimación de la orientación de los ejes de esfuerzos a partir de los sistemas de fallas normales pertenecientes a la familia 1 y familia 2 respectivamente de las estaciones geomecánicas 7 y 8.199	
Fig. 2.14. Distribución de las estaciones mesoestructurales y representación de los datos en falsillas de Schmidt. Representación de arcos correspondientes a dirección-buzamiento.	201
Fig. 2.15 a). Roseta de fracturación de los planos de falla normales y direccionales.	203
Fig. 2.15 b). Estructuras teóricas en un área sometida a esfuerzos comprensivos con orientación N170E.204	
Fig. 2.16. Posición de los puntos empleados para el cálculo del índice de gradiente del Talveg (SL), y cartografía de isovalores del índice de gradiente del Talveg (página siguiente).	210
Fig. 2.17. Mapa de distribución del índice relación anchura fondo valle/altura del valle (página siguiente).	214
Fig. 2.18. Trazado de la red hidrográfica en la zona de estudio a escala 1:140.000.	220
Fig. 2.19. a). Captura en “cuello de buey” de un meandro del río Eresma al norte de la localidad de Coca. Fotografía del año 1957.	220
Figs. 2.19. b) y c). Captura en “cuello de buey” de un meandro del río Eresma al norte de la localidad de Coca. Fotografía del año 2000.	221
Fig. 2.20. Red hidrográfica y afloramientos de Facies Cuestas en la zona de estudio.	223
Fig. 2.21. a). Principales meandros en el río Voltoya indicativos de actividad tectónica.	223
Figs. 2.21. b) y c). Principales meandros en el río Voltoya indicativos de actividad tectónica.	224
Fig. 2.22. Cartografía con la posición de los puntos de columna litológica conocida por métodos directos o indirectos (elaboración propia con datos del MAPA, 1999a y 2003) (página siguiente).	226
Fig. 2.23. Bloque diagrama proyectado en un plano con la reconstrucción tridimensional de la superficie topográfica actual.	230
Fig. 2.24. Bloque diagrama proyectado en un plano con la reconstrucción tridimensional del muro del acuífero eólico cuaternario (modificado de Galán et al, 2001)	230
Fig. 2.25. Bloque diagrama proyectado en un plano con la reconstrucción tridimensional del muro del acuífero mixto eólico-fluvial-lagunar cuaternario o techo del acuitardo terciario (modificado de MAPA, 1999a).....	231
Fig. 2.26. Superposición de tres bloques diagrama correspondientes a la superficie topográfica, muro del acuífero eólico cuaternario y muro del acuífero eólico y fluvial cuaternario (o techo del acuitardo terciario).	232

Fig. 2.27. Relieve terciario. Perspectiva en 21/2 D de la zona de estudio, con la ubicación de los núcleos urbanos y cauces principales, así como del umbral que separa ambas zonas de la Cubeta.....	234
Fig. 2.28. Cartografía de isopacas. La disposición de las cubetas y máximos espesores de arena quedan distribuidos, en general, de acuerdo con la orientación tectónica NNO-SSE.....	235
Fig. 2.29. Posición georreferenciada de los puntos de espesor máximo de arenas deducidos con la información disponible (técnicas directas e indirectas) y recta de regresión. Los ejes, correspondientes a coordenadas UTM se presentan a distinta escala.	237
Fig. 2.30. Bloque diagrama donde consta la reconstrucción tridimensional de la Cubeta desde dos perspectivas diferentes antes de depositarse las arenas eólicas.	238
Figs. 2.31 a) y b). Temperaturas medias y precipitaciones medias mensuales del periodo 1987-2002..	242
Fig. 2.32. Índices evapotranspirativos calculados para el año tipo medio en la estación 2502 por el método de Thornthwaite con una hipótesis de reserva de 40 mm.	243
Fig. 2.33. Rosa de los Vientos para la localidad de Coca. Fuente: www.inm.es.	244
Fig. 2.34. Ejemplo del grado de encajamiento del río Eresma a su paso por Villeguillo. Inmediaciones de la estación SAICA A-70 de la CHD.	247
Fig. 2.35. Bloque diagrama con la ubicación de las estaciones de aforo.	252
Figs. 2.36 a) y b). Columnas litoestratigráficas “tipo” para la Cubeta de Santiuste. Corresponden a los sondeos 184 y 158.	259
Fig. 2.37. Cartografía de distribución de los parámetros hidráulicos en la Cubeta de Santiuste (página siguiente).....	262
Fig. 2.38. Mapa de posicionamiento de los puntos de agua que constituyen las redes de control (Página siguiente).....	268
Fig. 2.39. Cartografía hidrogeológica para la situación de 1989. Fuente: IRYDA, 1990.....	271
Fig. 2.40. Cartografía hidrogeológica para la situación de agosto de 1999. Modificado de MAPA, 1999.....	272
Fig. 2.41. Cartografía hidrogeológica para la situación de septiembre de 2002 (aguas bajas). Escala 1:50.000.....	275
Fig. 2.42. Cartografía hidrogeológica para la situación de febrero de 2003 (aguas altas). Escala 1:50.000.....	277
Fig. 2.43. Cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Septiembre de 2002 (aguas bajas).	283
Fig. 2.44. Cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Febrero de 2003 (aguas altas).	285
Fig. 2.45. Trazado de los segmentos paralelos a los cauces fluviales en los que se ha dividido la zona de estudio. Posición de los perfiles.	290
Figs. 2.46 a) y b). Intersección del acuífero con una línea imaginaria paralela 100 m al cauce del río Voltoya y Eresma respectivamente por la margen izquierda (oeste), y proyección de las cotas de los niveles freáticos medidos en el año hidrológico 2002/03 y del cauce del río. Los símbolos gráficos corresponden a la numeración de los manantiales inventariados.	291
Figs. 2.47 y 2.48. Detalle de la localización de los manantiales inventariados sobre un bloque diagrama al que se ha añadido la cartografía geológica y un bloque digrama en otra perspectiva.	296
Fig. 2.49. Pozo Ranney de captación de aguas del río Eresma mediante un sistema tipo RBF. Las aguas alumbradas son dirigidas a una planta de tratamiento y potabilización en Íscar, localidad adyacente a Villeguillo por el este.	298
Fig. 2.50. Poligonal envolvente de los ramales este y oeste (41,062 km ²). Posición y área calculada. Facies terciarias de baja permeabilidad (amarillo) y arenas cuaternarias (gris). Figura sin escala.	304
Fig. 2.51. Representación de la sección de transferencia de aguas subterráneas desde la zona de estudio hacia el norte a partir de las mallas generadas para la superficie topográfica y el techo del acuitardo terciario. La capa freática se ha representado para una situación de aguas medias (junio de 2003). El punto en el margen inferior derecho corresponde a la cota del río Eresma.....	314
Fig. 2.52. Diseño y principales estructuras del caz de AR. (Página siguiente).....	330
Fig. 2.53. Mapa de isoespesores de la ZNS en septiembre de 2002 (aguas bajas).	333
Fig. 2.54. a). Perfil que ejemplifica el método volumétrico-algebraico (VA). La distribución del agua de recarga genera zonas con descensos de niveles (cut) y con relleno de depresiones (fill). El volumen de cálculo considerado es la diferencia entre ambos (cut-fill).	339
Fig. 2.54. b). Perfil que ejemplifica el método volumétrico-estadístico (VE). De acuerdo con este método, la superficie efectiva es variable para cada cota de infiltración.....	339
Fig. 2.55 a). Diagrama de dispersión en el que se estudia la variación del incremento del volumen de agua almacenado en el acuífero a lo largo del periodo de recarga con los datos disponibles.....	344
Fig. 2.55 b). Diagrama de dispersión en el que se estudia la variación del nivel freático medio para el sector occidental del acuífero a lo largo del periodo de recarga con los datos disponibles.	345

Fig. 2.55 c). Gráfica de incremento del nivel del agua-tiempo para el primer ciclo de recarga artificial (AR) desde el comienzo del año hidrológico (AH). Datos disponibles a lo largo del año hidrológico....	345
Fig. 2.55 d). Datos disponibles a lo largo del período de recarga. Interpolación de una curva polinómica y cálculo de su ecuación.....	346
Fig. 2.56 a). Distribución espacial de la tasa de infiltración ($m^3/m^2 \cdot año$). La distancia a la cabecera corresponde a la distancia entre los puntos de avance a lo largo del caz. Zonas sombreadas correspondientes a superficies de infiltración inefectivas.....	351
Fig. 2.56. b) y c). Distribución temporal de la tasa de infiltración ($m^3/m^2 \cdot año$). Escalas aritmética y logarítmica.	353
Fig. 2.57. Yetograma para el año hidrológico 2002/03.	353
Fig. 2.58. Gráfica con representación de los parámetros: nivel freático medio, incremento en el almacenamiento, yetograma y termograma para ciclos de heladas del primer ciclo de recarga artificial (días 5 de diciembre de 2002 a 1 de mayo de 2003, equivalentes a los días 67 a 214 del año hidrológico).	354
Fig. 2.59. Aspecto del caz de recarga artificial durante un período de heladas durante varios días consecutivos de enero de 2003.	355
Fig. 2.60. Relación entre el exceso de agua y la cubierta vegetal del terreno (en Petheran et al, 2000).	357
Fig. 2.61. a). Relación entre la permeabilidad horizontal (m/s) frente a caudal específico ($m^3/s \cdot m^2$).	358
Fig. 2.61. b). Relación entre la superficie de las balsas (hectáreas) frente al volumen total anual infiltrado (Tomadas de Custodio y Llamas, 1983).	358
Fig. 2.62. Curva típica para el caudal de infiltración en función del tiempo (escalas orientativas). El valor asintótico es casi cero en casos de agua muy turbia, abundantes finos y COT.	358
Fig. 2.63. Mapa de isovariaciones del bulbo de humidificación durante el primer período de recarga artificial. Año hidrológico 2002-03 (Página siguiente).	359
Fig. 2.64. Perfil evolutivo del bulbo de humidificación para el año hidrológico 2002/03 (1 ^{er} ciclo de AR).	365
Figs. 2.65 a) b) y c). Drenaje de la vía del Tren de Alta Velocidad y estructuras asociadas y paso del caz de recarga bajo la vía. En este punto se ha aforado un volumen superior al de la estación anterior por aportaciones en forma de escorrentía superficial canalizada.	366
Figs. 2.66 a) y b). Afloramiento del caz por el norte de Villeguillo tras atravesar el casco urbano enterrado. Zona de alcance de la excavación junto a una antigua acequia y vertido sobre una superficie prácticamente plana en una zona adyacente a antiguos humedales.	367
Fig. 2.67. Mapa de isovariaciones máximas de la capa freática para el periodo comprendido entre septiembre de 2002 y febrero de 2003. Se han representado las zonas con el nivel freático por encima de la profundidad de alerta (2 m) en algún momento del A.H.. (Página siguiente).	369
Figs. 2.68 a) y b). Hoja de contactos en la que se muestra la intersección de una capa freática ficticia horizontal y el paleorrelieve a comienzos del periodo cuaternario. Los distintos niveles de llenado son indicadores de la cota y del sentido de transferencia de caudales entre cubetas. Páginas consecutivas.	380
Fig. 2.69. Cartografía de Unidades Hidroambientales sobre la ortoimagen digital. Escala aproximada 1: 150.000.	391

ÍNDICE DE TABLAS

	Págs.
Tabla 2.01. Cálculo de los índices climáticos por el método de Thornthwaite: Evapotranspiración potencial (EtoPM), Lluvia útil (P-ETP), Evapotranspiración real (ETR), falta y exceso de agua (en mm).	243
Tabla 2.02. Caudales punta obtenidos por aplicación de los métodos HEC-1, Gumbel y Log-Pearson. Tiempo de retorno (T) en años.	247
Tabla 2.03. Coeficientes de regionalización aplicables a la cuenca del río Voltoya.	248
Tabla 2.04. Cálculo del caudal punta por el modelo hidrológico HEC-1.	248
Tabla 2.05. Cálculo del caudal punta por los métodos de Gumbel y Log Pearson para distintos periodos de retorno (T) en años.	249
Tabla 2.06. Cálculo del caudal punta por el método racional.	249
Tabla 2.07. Cálculo del caudal punta para distintos periodos de recurrencia.	250
Tabla 2.08. Caudales registrados en las estaciones de aforo.	252
Tabla 2.09. Parámetros hidrogeológicos calculados para el acuífero superficial de la Cubeta de Santiuste (diversas fuentes).	261
Tabla 2.10. Resultados para el cálculo de la altitud con diferentes interpoladores frente a la altitud de precisión. Los mejores resultados fueron proporcionados por la triangulación para este tipo de variable, con ligeras diferencias sobre los restantes.	280



Tabla 2.11. Datos disponibles relativos a sondeos profundos en la zona de estudio.....	281
Tabla 2.12. Volúmenes percolados hacia el acuífero profundo calculados aplicando distintas metodologías (valores en hm ³ /año).	288
Tabla 2.13. Tabla resumen del balance hídrico en el acuífero superficial de la Cubeta en 1990. (Modificado de IRYDA, 1990). Unidades en hm ³ /año.	301
Tabla 2.14. Tabla resumen del balance hídrico en el acuífero superficial de la Cubeta en 1999. (Modificado de MAPA, 1999a). Unidades en hm ³ /año.	302
Tabla 2.15. Resultados de infiltración obtenidos al aplicar las tres metodologías descritas	304
Tabla 2.16. Manantiales en el sector oeste del área de estudio.	306
Tabla 2.17. Consumos de agua en las localidades de la zona de estudio. Datos de encuestas.....	306
Tabla 2.18. Retornos al sistema del agua de abastecimiento importada del exterior de la Cubeta (Fuente propia).....	307
Tabla 2.19. Estimación de los retornos de riego al sistema. La carencia de un elenco de regadíos apropiado ha impedido realizar un cálculo de mayor precisión, por lo que la horquilla de valores planteada se basa en una interpretación apoyada en datos parciales.	308
Tabla 2.20. Presentación tabulada de los datos y resultados del cálculo darciano aplicado para evaluar las aportaciones subterráneas a la Cubeta.	309
Tabla 2.21. Aportaciones subterráneas calculadas.....	309
Tabla 2.22. Entradas del balance hídrico con desglose de los componentes.....	310
Tabla 2.23. Estimación del caudal de explotación a través de captaciones destinadas al abastecimiento urbano e industrial no conectadas a la red de suministro.	311
Tabla 2.24. Consumos calculados por necesidades hídricas de la cabaña ganadera.....	311
Tabla 2.25. Consumos calculados totales para la zona de estudio. Año hidrológico 2002/03.	311
Tabla 2.26. Volumen de agua cedido a los ríos drenantes por el acuífero en situación de “aguas muy altas”. Año húmero y operaciones de AR.	312
Tabla 2.27. Volúmenes descolgados hacia el acuífero profundo a través de sondeos penetrativos conocidos (hm ³ /año).	315
Tabla 2.28. Volúmenes percolados hacia el acuífero profundo calculados aplicando distintas metodologías (valores en hm ³ /año).	316
Tabla 2.29. Salidas del balance hídrico desglosadas para la Cubeta en el año hidrológico 2002/03....	317
Tabla 2.30. Entradas del balance hídrico desglosadas. Cubeta de Santiuste. Año hidrológico 2002/03....	317
Tabla 2.31. Salidas del balance hídrico desglosadas. Cubeta de Santiuste. Año hidrológico 2002/03.	318
Tabla 2.32. Datos disponibles para la resolución de la ecuación general del balance hídrico. Cubeta de Santiuste. Año hidrológico 2002/03.	318
Tabla 2.33. Cálculo de volúmenes mediante el método volumétrico. Totalidad de la superficie de infiltración efectiva de la Cubeta (41,1 km ²).	319
Tabla 2.34. Coordenadas UTM de las principales estructuras obtenidas con GPS monofrecuencia.	326
Tabla 2.35. Primer ciclo de recarga artificial 2002/03. Coordenadas de los puntos de alcance del frente de AR en el caz con su fecha correspondiente.	328
Tabla 2.36. Posición de los tramos de infiltración efectiva a lo largo del caz de recarga, y distancia con respecto a la cabecera. Coordenadas UTM tomadas con GPS monofrecuencia.	329
Tabla 2.37. Cálculo de volúmenes mediante el método volumétrico algebraico para el área de influencia del bulbo de humidificación en el sector occidental de la Cubeta (7,128 km ²).	341
Tabla 2.38. Cálculo de volúmenes mediante el método volumétrico para la totalidad de la superficie de infiltración efectiva de la Cubeta (41,1 km ²).	341
Tabla 2.39. Cálculo de volúmenes mediante el método estadístico. Datos de partida.....	342
Tabla 2.40. Cálculo de volúmenes mediante el método WTF (volumétrico estadístico) para la zona de influencia del bulbo de humidificación del sector occidental del acuífero.	343
Tabla 2.41. Superficies empleadas para los diferentes cálculos.	349
Tabla 2.42. Variación del volumen de agua almacenada y del nivel freático a lo largo del primer ciclo de recarga artificial con los datos disponibles (Resultados del proceso de cálculo descrito).....	349
Tabla 2.43. Posición del frente de avance de la lámina de agua con respecto a la fecha durante el primer ciclo de AR. La distancia a la cabecera corresponde a la distancia entre los puntos de avance a lo largo del caz.....	350
Tabla 2.44. Días con temperatura mínima bajo cero del año hidrológico 2002/03 en la estación agroclimática SG-02 de Navas de Oro (Fuente: Inforiego).....	356
Tabla 2.45. Caudales aforados a lo largo del dispositivo de AR el 21-01-2004. Fuente: MAPA.	364
Tabla 2.46. Superficies empleadas para los diferentes cálculos.	400
Tabla 2.47. Resumen: Datos disponibles para la resolución de la ecuación general del balance hídrico.....	401

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

1. INTRODUCCIÓN

El Buen Estado de las Aguas (BEDLA), objetivo marcado en la Directiva Marco para el año 2015, requiere un tratamiento integral de las masas de agua tanto en cantidad como en calidad. En este contexto, cualquier actuación de recarga artificial de acuíferos (AR) requiere tener en cuenta la disponibilidad de agua de recarga y de un medio idóneo para ser recargado (*IGME, 2000d*). Consecuentemente, cualquier actuación de recarga artificial conlleva conocer con detalle tanto la hidrología superficial como el acuífero. Así mismo es preciso plantearse cuestiones relativas a cantidad y calidad de sus aguas antes, durante y después de las operaciones de AR.

El problema cuantitativo, principal condicionante en las operaciones de AR, ha sido considerado tradicionalmente como prioritario respecto a los cualitativos en las operaciones de AR realizadas hasta la fecha en la zona. En la actualidad se están desarrollando proyectos e investigaciones, tanto para el alcance del acuífero de Los Arenales (*MIMAM, 2001*) como para la zona de estudio (*MAPA, 2003*). En ambos estudios se describe y realiza un modelo matemático de flujo con objeto de ver la distribución espacial de las aguas y su cantidad.

El tratamiento de la **cantidad** suele ser abordado mediante esta técnica, de acuerdo con disposiciones legales que la dotan de la categoría de técnica apropiada para los fines pretendidos, como es la Directiva 2000/60/CE, que en su Anexo 2 considera la modelización una “*herramienta apropiada*”.

Dado que en la actualidad se están llevando a cabo esfuerzos importantes por modelizar la zona de estudio por parte de la Administración, el desarrollo de este Bloque va a versar sobre el estado de la cuestión en otra dirección: la calidad. Para ello se presenta una serie de ideas, técnicas y herramientas, cuyo desarrollo y aplicación contribuye al avance hacia el conocimiento del acuífero, y, por ende, hacia el “Bedla”. Se presentan además algunas conclusiones específicas extraídas del análisis de antecedentes y de los modelos estudiados.

El tratamiento de la **calidad** es complementario, dada la escasez de antecedentes. Su estudio se lleva a cabo en el Bloque 3.

1.1. OBJETIVOS

El avance en el conocimiento del acuífero se plantea de manera secuencial con un formato típico de estudios hidrogeológicos análogos, clásico pero efectivo.

En primer lugar, se pretende profundizar en aspectos geológicos del acuífero escasamente conocidos, desde la cartografía detallada de paleocauces y lentejones de gravas (paleorrañas, etc.), influencia de la tectónica en el funcionamiento



hidrogeológico del sistema, a la discretización en la vertical de distintos compartimentos acuíferos.

Más tarde se estudian los aspectos relativos al clima e hidrología superficial.

El estudio de la hidrología subterránea parte de un nuevo inventario de puntos de agua, etapa previa para la actualización de las cartografías y perfiles hidrogeológicos y de las relaciones río-acuífero.

A continuación, se realiza un nuevo balance hídrico del acuífero superficial a escala de *Cubeta*, desglosando sus distintos componentes y estudiando su sectorización.

Posteriormente, se pretende describir con detalle el dispositivo de recarga artificial y realizar una memoria del primer ciclo de AR en la *Cubeta*.

Ulteriormente, a partir de todos los criterios hidrogeológicos recopilados, se pretende llevar a cabo una zonificación de la zona de estudio, definiendo una unidad de zonificación operativa para las labores de AR, que será definida *Unidad Hidroambiental* o UHA.

El fin último es contribuir al diseño de un corolario de normas técnicas basadas en los resultados de cálculos hidrogeológicos cuantitativos y cualitativos, etc. Estas técnicas permiten determinar el punto óptimo o teórico cuantitativo de funcionamiento de las instalaciones de recarga en cada sector de la zona de estudio. Por ejemplo, se destaca las posibilidades de recarga artificial con excedentes hídricos en la época lluviosa, la infiltración por pozos abandonados; la determinación de zonas con mayor índice de peligrosidad y riesgo de inundación, zonas aisladas donde no llega el efecto de las aguas infiltradas dentro del “campo de bombeo”, retornos a los cauces fluviales, etc.; o el análisis de la recuperación de humedales hidrodependientes mediante recarga artificial estimulada.

2. HILO CONDUCTOR

Para el cumplimiento de los objetivos previstos se propone el siguiente hilo argumental, en un intento de conseguir un orden de presentación de las distintas fases de la investigación didáctico y expresivo, a pesar de resultar algo clásico.

El bloque está compuesto por cuatro apartados:

El primero abarca los aspectos menos conocidos de la geología del acuífero, con especial atención a su estratigrafía, estructura y geometría.

El segundo abarca los aspectos más relacionados con un estudio hidrogeológico, atendiendo al clima, hidrología superficial y subterránea, para terminar con un balance hídrico a escala de *Cubeta* para la situación del año 2003.

El tercero describe las operaciones de AR llevadas a cabo y las conclusiones obtenidas como resultado de la experiencia.



En el cuarto se lleva a cabo una división de la zona de estudio en unidades homogéneas o unidades específicas para el estudio de operaciones de AR, que han sido designadas Unidades Hidroambientales (UHAs).

Este esquema aparece sintetizado en la Fig. 2.01 para los apartados posteriores:

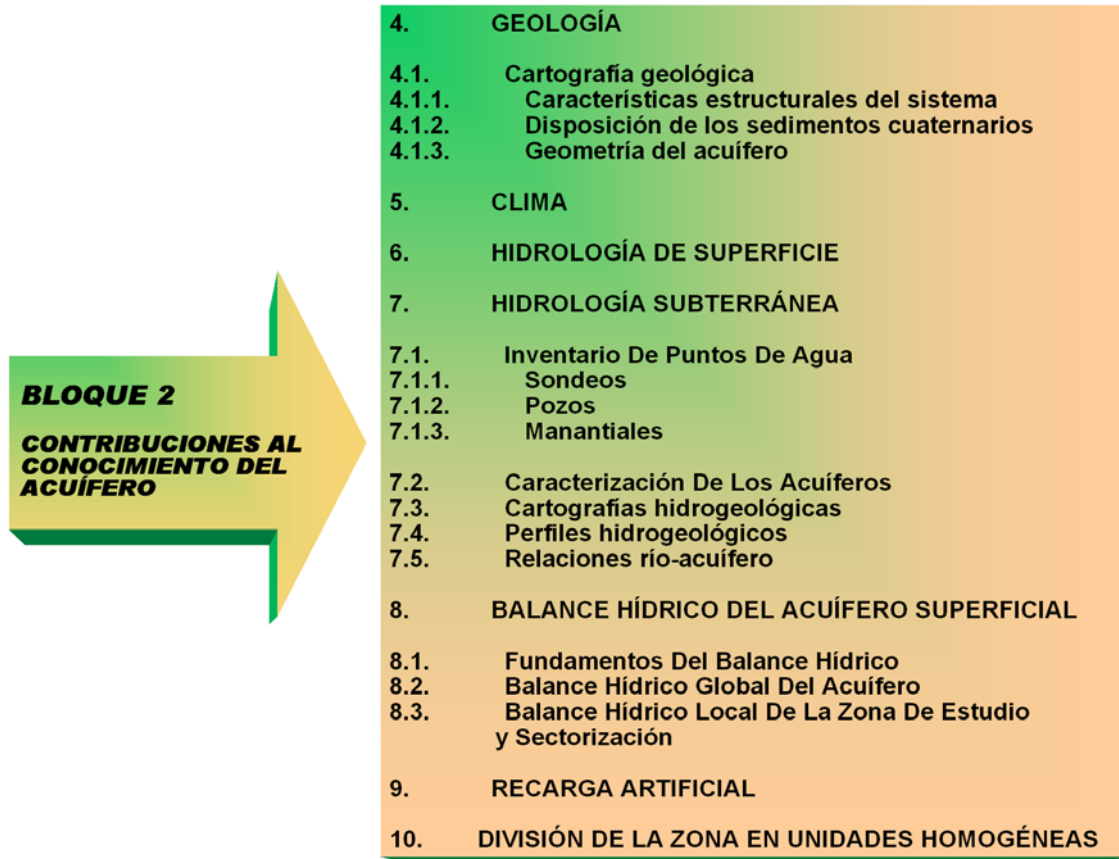


Fig. 2.01. Esquema argumental del Bloque 2: “Contribuciones al conocimiento del acuífero”.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La mayor parte de los materiales y métodos empleados en el desarrollo de este bloque han sido definidos en el Apto. VI del preámbulo. Los más específicos se presentan a continuación.

En cuanto a los **materiales**, además de los ya citados, cabe añadir el empleo del instrumental específico de campo: martillo y brújula, un estereoscopio de bolsillo y uno de gabinete, cámaras de fotos, un hidronivel SEBA graduado, etc.

El **estudio de lineamientos por fotointerpretación** se ha realizado mediante el reconocimiento fotogeológico de varios fotogramas de la zona de estudio, detectando pliegues de escala kilométrica y lineamientos. Los lineamientos han sido posicionados, estudiando su dirección en ordenador. Con estos se ha realizado un inventario para cada tipo de estructura (cuyo listado se presenta en el Anexo 2.1), atendiendo especialmente a su geometría y orientación, y prestando especial atención a aquellas estructuras que previsiblemente sean condicionantes del comportamiento hidrogeológico del sistema.

Para ello se han recopilado y analizado fotografías a escala regional, intermedia y local, en busca de lineamientos y estructuras geológicas y tectónicas.

El estudio a escala regional se ha realizado sobre tres ortoimágenes a escala variable, que han posibilitado emplazar nuevos lineamientos y estructuras a una escala superior a la habitual en un estudio de este tipo. Las “ortos” empleadas han sido la 612-1991, 802-2000 y 803c-2002. Se ha optado por imágenes de distintas fechas y estaciones, con objeto de detectar aquellas estructuras que pueden pasar desapercibidas.

Las características de las ortoimágenes empleadas son:

- Imagen Spot de órbita 031 con 3731 columnas, sensor multiespectral y bandas 1, 2 y 3 de 12 de junio de 1991.
- Imagen Spot 2 de órbita 032 con 3521 filas y 3888 columnas, datum ED 50, bandas 1, 2 y 3 de 2 de agosto de 2000.
- Imagen Landsat de órbita 202 con 3386 filas y 3781 columnas, órbita 202, sensor multiespectral píxel 2D, bandas 1 a 7-9, Datum ED 50.

Para el estudio a escala subregional o intermedia, se ha consultado un bloque diagrama a escala 1:800.000 elaborado a partir del MDT con paso de malla de 100 m del Servicio Geográfico del Ejército (SGE).

La escala de observación local o “de detalle” se ha realizado sobre fotogramas aéreos seriados a distintas escalas, como son los del “vuelo americano” de 1957 a escala 1:33.000 (fotogramas 6557 a 6560, 6614 a 6616, 8724 a 8728 y 20669 a 20672); las del SGE de 1977, a escala 1:22.000 (fotos 428 C12, C15, C18, D13, D16, D19, E13, E16, E19, F12, F15, F18, G13, G16, 455 A 14, A17, A20, 456 B14, B17 y B20); y la ortoimagen del vuelo de la JCL del año 2000, a escala 1:15.000, hojas 428 y 455).

Se han seleccionado las dos zonas con mayor evidencia de actividad tectónica, que coinciden con el trazado del río Eresma a su paso por Villeguillo (sector norte de la *Cubeta*) y del río Voltoya a su paso por Santiuste de San Juan Bautista (sector sur).

El estudio de las **anomalías geomorfológicas** se ha realizado sobre la ortoimagen digital georreferenciada del año 2000 de la JCL y el empleo de un MDT de un metro de resolución.

La reconstrucción de la geometría del acuífero a partir de datos **indirectos** se ha realizado con datos bibliográficos procedentes de dos campañas de prospección geofísica promovidas por el MAPA, con un total de 147 SEVs distribuidos en el área de estudio (*IRYDA, 1990* y *MAPA, 1999a*).

La realización de aforos secuenciales se ha llevado a cabo empleando un molinete SEBA.

El tratamiento de los **datos climáticos** procedentes del IMN se ha realizado mediante las aplicaciones informáticas *Clima 1.0*, del MAPA, e *Hidrobis 3.0*, del IGME.

La modelización con datos climáticos se ha realizado mediante el paquete de programas *Whi Unsat Suite Pro 2.1*, de Waterloo Software, Ontario (Canadá), paquete que engloba al modelo *HELP*.

La elaboración de **cartografías hidrogeológicas**, perfiles y del modelo analógico se ha realizado mediante las aplicaciones *Surfer 8.0*, *Grapher 2.0* y *Arc/View 2.2*. En todos los casos ha sido preciso un “retoque” manual en aquellos casos en los que el interpolador se desviaba demasiado de los cálculos previos.

Las gráficas se han realizado con *Office 2000* y *Grapher 2.0*.

Las imágenes han sido retocadas con el programa *Adobe Photoshop 7.0*.

La **delimitación de las unidades homogéneas** se ha realizado con el empleo de la herramienta GIS Arc/view 3.2, empleando para ello las siguientes coberturas:

- Subcuencas hidrográficas, empleando para ello una cobertura oficial del CEDEX.
- Cartografía geológica digital georreferenciada, con objeto de determinar las zonas susceptibles (geológicamente) de ser recargadas (aluviales de ríos, zonas carstificadas, etc.).
- Cobertura de usos del suelo, zonas regables, mapa forestal de España, etc. En la actualidad, esta cobertura se encuentra publicada.
- Cobertura de ríos y cauces fluviales con datos foronómicos del Ministerio de Fomento.
- Red de control de nitratos en las aguas subterráneas.
- Cobertura de humedales del ICONA.
- A estas coberturas hay que añadir las generadas durante el desarrollo de este trabajo. Destacan la de lineamientos tectónicos, unidades ambientales, pendientes, etc.

- El factor sociológico no ha sido considerado en la delimitación establecida, salvo por usos del suelo.

En cuanto a los **métodos**, dado el elevado número de técnicas a lo largo del bloque, se ha considerado improcedente extraer y adelantar todas las metodologías, hecho que podría provocar dispersión y necesidad de pasar páginas innecesariamente. En consecuencia, se ha optado por intercalar las distintas sistemáticas empleadas en sus apartados correspondientes, extrayendo algunas nociones teóricas de empleo generalizado, que se presentan en el apartado 4 y en el Glosario (Apéndice 2).

4. MARCO TEÓRICO

Este bloque, eminentemente hidrogeológico, se apoya en una serie de nociones y conceptos de aceptación general, que, por razones de amplitud, no es procedente incluir. No obstante, en el Apéndice 3. *Glosario*, se definen los considerados más destacables.

Algunas nociones específicas colaterales, como son los procedimientos de interpolación para cartografía automática y su empleo, se presentan a continuación, como consecuencia de la abundancia de cartografías generadas a lo largo de este bloque y de los posteriores.

4.1. PROCEDIMIENTOS DE INTERPOLACIÓN

La elaboración de mapas de contornos requiere el empleo de interpoladores automáticos. A continuación, se describe el método de interpolación, así como las características, ventajas e inconvenientes de cada método (*tomadas de Fdez. Escalante, 2001b*).

Las gráficas de distribución de determinados parámetros en el campo presentan diversas morfologías, lo que lleva a definir la **variable regionalizada**, como aquellos parámetros que tienen una cierta estructura espacial y simultáneamente una componente aleatoria, ya que cada punto de la gráfica tiene una cierta aleatoriedad como corresponde a medidas tomadas en campo, resultados de laboratorio, etc. Este concepto fue introducido por Krige y es la base del método de interpolación “kriging”, que determina la estructura de la variable para minimizar el error en su estimación.

La **función aleatoria** FA es una función del tipo $z(x)$. Para cada valor de X nos da como resultado el valor de la variable regionalizada en ese punto:

$$Z(x_i) = VR_{xi}$$

La zona del espacio en la que se cumple una determinada función es el **dominio** (espacial o temporal) en el que queda definida la variable regionalizada.

Para definir una función aleatoria en un dominio, ésta debe ser estacionaria, es decir, su ley de distribución de probabilidad es invariable por traslación (dentro del dominio definido). Esta ley se suele ajustar a una campana de *Gauss*. Si no se ajusta, suele ser preciso definir un nuevo dominio.

En cada dominio se suele mantener la media y la varianza en todos sus puntos. Si esta tendencia en lugar de ser estacionaria es creciente, se habla de **deriva** (los valores que definen la función de distribución no son constantes, por tanto, no hay estacionalidad).

Si al aplicar una variable regionalizada a una determinada función no hay estacionalidad, se toman como estacionarios los incrementos de 1.º orden. Esta es la **hipótesis intrínseca** (si consideramos los incrementos, podemos decir cuanto se ha incrementado la variable).



Un tipo de función aleatoria de gran importancia en geoestadística es el **variograma**, según el cual la varianza de los incrementos de la variable existe y tiene un valor definido y constante. Define, por tanto, la estructura de un fenómeno o la función aleatoria de la variable en el espacio y en el tiempo.

El variograma puede presentar distintas morfologías (lineal, esférico, etc.). Diferenciando sus principales componentes cabe definir el “alcance” o distancia desde el origen hasta que el variograma alcanza la horizontalidad (indica hasta qué distancia hay correlación entre los puntos). La distancia en la vertical del alcance se denomina “meseta”. Ambos elementos son indicadores de la estructura de la variable en el espacio. Si la tendencia de la curva se mantiene, se dice que hay correlación. Si la gráfica presenta una pendiente muy acusada, la correlación sólo existe entre un punto y los más próximos a él. Si la pendiente es muy tendida, cada valor es dependiente de los puntos más cercanos y más lejanos (como, por ejemplo, la función de distribución de la permeabilidad).

Por tanto, todos los datos tomados en un terreno o variables regionalizadas deben ser estudiados para ver la forma de su variograma experimental, considerando su distribución espacial o temporal a partir de la nube de puntos. Con el variograma experimental se puede obtener el teórico o interpolador que mejor se ajuste.

- **Kriging**

Es un método de interpolación geoestadística de probada utilidad y amplios campos de aplicación. Se utiliza principalmente para datos distribuidos irregularmente. Es de gran flexibilidad y permite definir el variograma modelo de interpolación, que consta de tres factores: el variograma modelo (con una escala, amplitud y longitud), el tipo de desfase, y el efecto “pepita” o distancia al origen en el eje Y (Fig. 2.02).

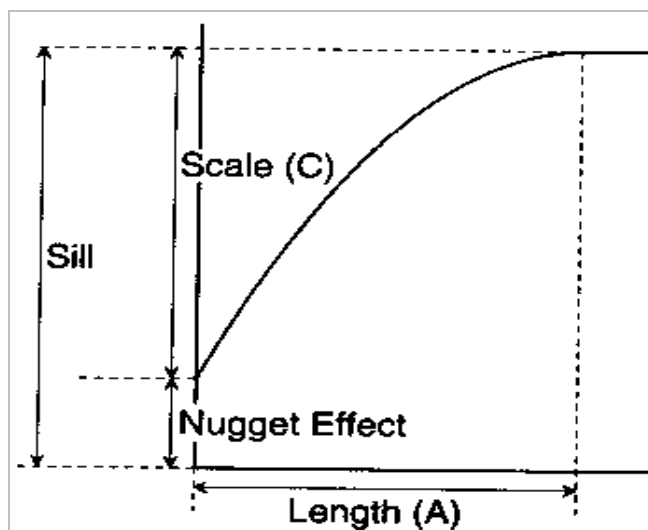


Fig. 2.02. Modelo de variograma típico. Fuente: Golden software, 2002.

Durante el Kriging, se aplica un peso de interpolación a los puntos al generar la malla por funciones directas a partir del variograma modelo definido (esférico,

exponencial, lineal, etc.). En la mayoría de los casos, la amplitud del variograma debe ser aproximadamente igual a la varianza de los datos observados. El desfase puede ser cero para datos irregularmente distribuidos o puede ser ajustado si se distribuyen con alguna estructuración conocida. El efecto “pepita” conlleva que el interpolador se implique menos en el cálculo de los puntos individualizados, por lo que resulta apropiado en nubes de puntos muy dispersas.

- **Ajuste por mínimos cuadrados**

Es un interpolador del promedio del peso, bien exacto (lo más común) o bien suavizado. El algoritmo sopesa todos los puntos con valor, de modo que la influencia sobre un punto es menor cuanto más distante está este punto. Cada valor es asignado a un punto dependiendo de un factor de peso, que es dependiente de su distancia al nodo. Por eso es frecuente encontrar curvas con forma de “ojos de toro” en torno a la posición de las observaciones.

- **Triangulación con interpolación lineal**

El número de triángulos puede resultar extraordinariamente grande, pero queda bastante reducido cuando cada punto se une como máximo con los más cercanos a su entorno, procurando soslayar aquellos que, de ser enlazados, introducirían mínimos o máximos a lo largo de una línea del triángulo.

Una vez acotados estos lados, se unen los puntos de igual valor mediante líneas, cuyo contorno se suaviza, obteniendo así el mapa de isolíneas.

El método, aunque objetivo en su conjunto, presenta ciertos inconvenientes:

- Los máximos y mínimos, o ambos a la vez, coinciden necesariamente con los valores de los datos obtenidos, lo que no siempre es real.
- El trazado de alguna isolínea queda bastante indeterminado en alguno de sus recorridos, especialmente las que cierran sobre sí mismas.
- La pendiente se considera constante entre cada dos puntos, lo cual puede ser falso para algunas superficies complejas o cuando los puntos están muy distanciados.
- Los máximos y mínimos relativos desaparecen.
- Cuando la densidad de puntos es muy abundante es preciso determinar un radio de influencia para cada uno de ellos.
- Cuando se aplica a mallas sistemáticas o a mallas aleatorias estratificadas, pueden surgir problemas con los valores de los vértices empleados para definir el valor del punto central de la malla elemental.

5. GEOLOGÍA DE LA CUBETA DE SANTIUSTE

Los principales objetivos de este apartado son:

- Actualización de la cartografía geológica.
- Estudio de la geometría del acuífero y conexión con el flujo profundo regional.

5.1. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

La cartografía que se presenta a continuación es una modificación de la cartografía geológica editada por el ITGE de las hojas a escala 1:50.000: 428 (16-17), Olmedo; 429 (16-18), Cuéllar; 455 (16-18), Arévalo, y 456 (16-19), Nava de la Asunción. A éstas se han añadido ciertos elementos tectónicos (básicamente fallas supuestas), hidrogeológicos (rezumes, manantiales) y geomorfológicos.

La cartografía temática ha sido realizada a escala 1:50.000, cobrando entidad por sí misma y representando, además, una cobertura ráster importante para la posterior empleo en Sistemas de Información Geográfica (GIS) para delimitar zonas homogéneas.

Se ha realizado una comprobación en ortoimagen y en campo de los contactos de las principales formaciones influyentes en el funcionamiento del sistema, procediendo a su georreferenciación. Para ello se ha utilizado un GPS monofrecuencia en campo. Algunos contactos han sido digitalizados directamente en la pantalla del ordenador.

En la Fig. 2.03 se presenta el mapa geológico de la zona de estudio (*tomado de Fdez. Escalante, 2002, modificado de IGME, 1982d*).

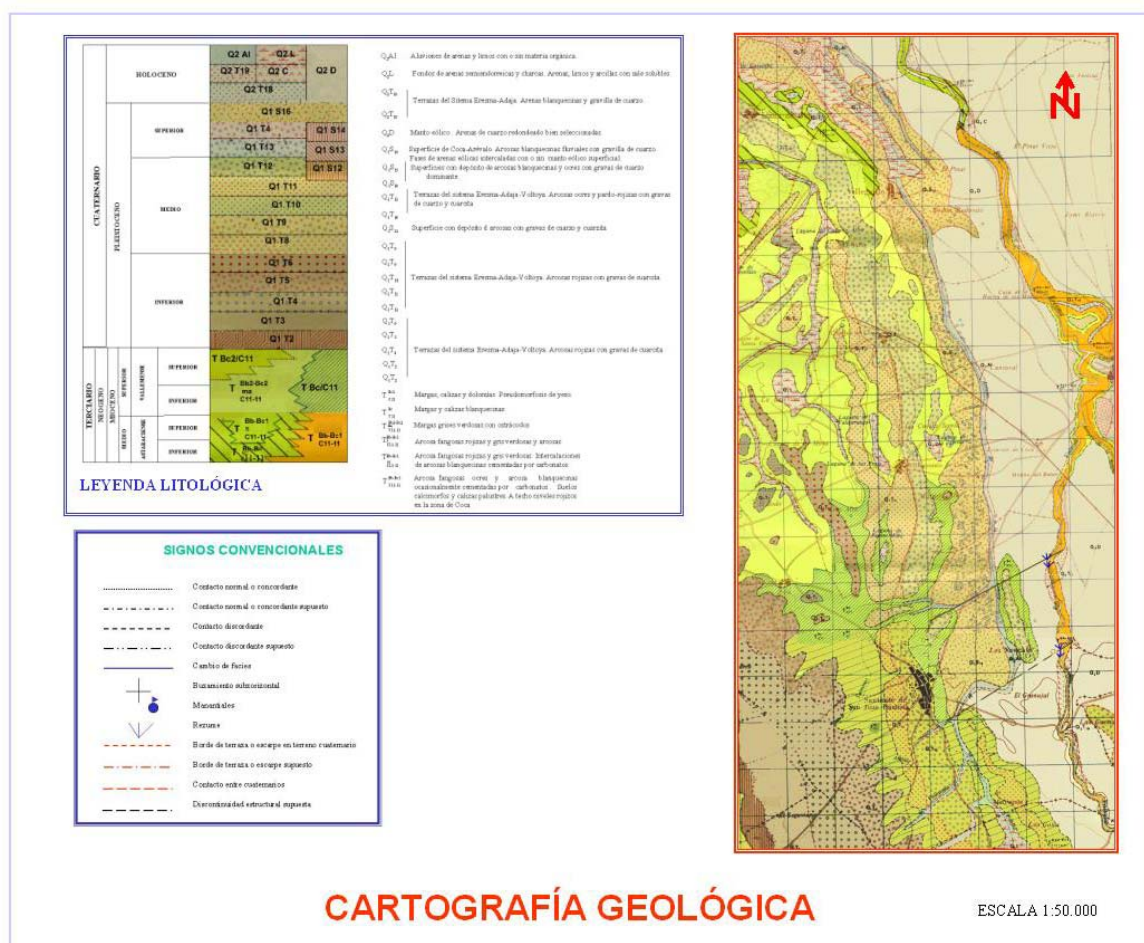
La cartografía presenta además lineamientos que se ha constatado que funcionan como drenes en el vaciado del acuífero, bien sea de origen tectónico o bien por canales de gravas fosilizados.

Con objeto de realzar aquellas características del paisaje condicionadas por la geología, se ha realizado un bloque diagrama con el Modelo Digital del Terreno (MDT) de la zona de estudio. A este se ha sobrepuesto una cobertura ráster georreferenciada del mapa geológico, previamente modificada y retocada con el programa *Adobe Photoshop CS*. Este tipo de representación permite sobreponer en GIS una imagen vectorial a una ráster, como se muestra en la fig. 2.04.

Los principales relieves coinciden en gran medida con los afloramientos de facies terciarias, así como la presencia de depósitos de piedemonte en la margen oeste del arroyo de la Ermita. Además hay varios sistemas de terrazas fluviales sobrepuestos en las márgenes de los ríos Voltoya y Eresma, con distribución asimétrica y mayor desarrollo en la margen izquierda de los cauces, como veremos más adelante.

Fig. 2.03. Mapa geológico de la zona de estudio (página siguiente).

Fig. 2.04. Bloque diagrama del Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio con una cobertura ráster sobrepuesta (página posterior).





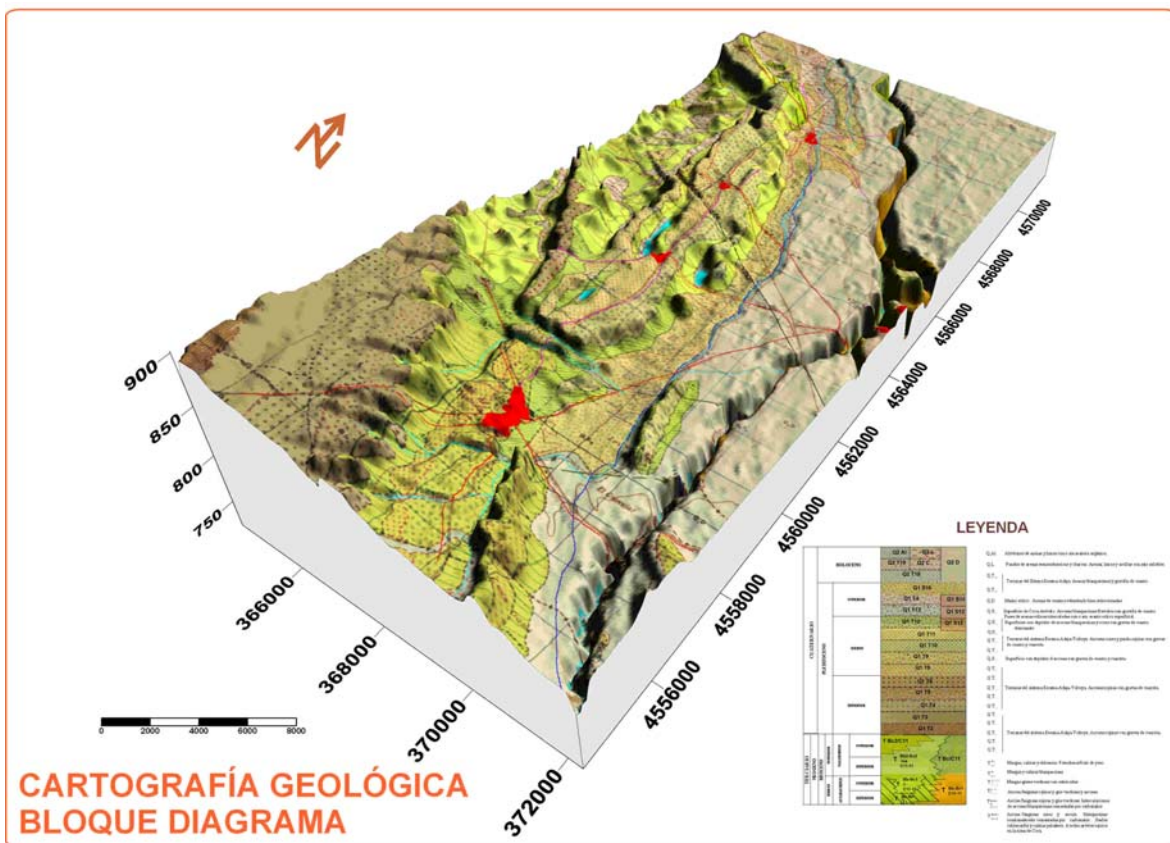


Fig. 2.04. Bloque diagrama del Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio con una cobertura ráster sobrepuesta.



5.2. DISPOSICIÓN DE LOS SEDIMENTOS CUATERNARIOS

Como complemento a las litofacies principales de la zona de estudio, definidas en el Bloque 1, Apto. 5.2, se ha estudiado el origen de estructuras y características de los sistemas dunares y fluviales ubicados en la zona de estudio.

Los sedimentos cuaternarios que constituyen el acuífero resultan de la distribución de un ambiente eólico sometido a abundantes acciones hidrodinámicas y una redistribución por procesos fluviales, típico de condiciones de periglaciario. Los episodios más energéticos se ubican en las inmediaciones de los cursos fluviales actuales, que han constituido cuatro niveles de terrazas diferentes (*Alcalá del Olmo, 1975*).

Teniendo en cuenta la distribución de los ambientes sedimentarios, la distribución en bandas de los distintos sedimentos que representan los diferentes subambientes de un sistema mixto (fluvio-lacustre y eólico), puede indicar la presencia de zonas con diferentes subsistencias, relacionadas con movimientos tectónicos (*Garrido Mejías, 1982*).

El **sistema dunar**, que se emplazó en la *Cubeta* a finales del terciario (*IGME, 1982d*), colmatando el paleorrelieve previo, presenta indicios de progradación, o movimiento de las dunas desde el suroeste hacia el noreste (*IGME, 1982d*). Este supuesto ha sido confirmado por las estructuras sedimentarias localizadas en el sistema dunar, que, aunque sean puntuales, han permitido confirmar la dirección de progradación principal, cuya orientación es aproximadamente similar a las líneas de flujo de las aguas subterráneas en la actualidad (Fig. 2.05 a y b).



Figs. 2.05 a y b. Estructuras sedimentarias típicas de sistema dunar (estratificación cruzada de bajo ángulo) localizadas en los taludes de los ríos Voltoya y Eresma en las localidades de Coca y Villeguillo respectivamente. Los sets confirman una dirección de progradación suroeste-noreste.

En cuanto a los **sistemas fluviales**, la observación de un mapa litológico de la zona de estudio permite apreciar que las formaciones cuaternarias más recientes, especialmente las fluviales, aparecen alineadas de acuerdo con unas directrices determinadas. Para determinar tales directrices, se han cartografiado las terrazas y “cauces” principales en campo, que han sido representados en la cartografía geológica modificada (Fig. 2.03). Se ha generado además un mapa de trabajo, que más tarde fue digitalizado y cargado a un Sistema de Información Geográfica (GIS) tipo *Arc/View 3.2* (Fig. 2.37) para el cálculo de índices geomorfológicos.

El carácter lineal de los afloramientos fluviales y su “semiparalelismo” ha permitido tomar medida de la orientación de las bisectrices de estos afloramientos (línea interpolada uniendo los centros de gravedad de cada afloramiento). Estas orientaciones han sido de nuevo cargadas en el GIS. Como resultado se aprecia que los resultados son bastante concordantes. La orientación predominante es la NE-SO, junto con la NNO-SSE, con una desviación típica inferior al 10 %.

Esta distribución, consecuentemente, parece haber influido tanto en la geometría del acuífero como en su funcionamiento hidrogeológico, al ser previsible una conductividad hidráulica mayor en las formaciones aluviales fosilizadas que en las restantes.

Este hecho podría ser explicado, al igual que en el caso anterior, por el basculamiento hacia el noreste de uno o varios bloques del basamento cristalino de escala superior a la de la *Cubeta*, acompañado de un movimiento compresivo ortogonal con flexura, mientras que la vergencia general de la cuenca es hacia el oeste. La posición relativa de los mencionados bloques induce a pensar en que los lineamientos principales de diferentes orientaciones son debidos a que estos sectores se apoyan sobre distintos bloques del zócalo. Esta suposición requeriría la realización de un estudio de geofísica profunda para que tomara carácter de hipótesis.

A caballo entre la estratigrafía y la geomorfología, los **niveles de terrazas** aportan importante información relativa a los indicios de actividad tectónica. La cartografía de estas formaciones aporta información adicional sobre el origen genético del sistema y su funcionamiento. Según reseñas bibliográficas se distinguen en el acuífero de Los Arenales hasta cuatro niveles de terrazas (*Alcalá del Olmo, 1975*), si bien no todos ellos están presentes en la *Cubeta*.

En ella se distinguen claramente tres niveles de terrazas en los taludes de los ríos Eresma, y, sobre todo, Voltoya, en la zona del Molino del Quemao, en Moraleja de Coca, al sur de la zona de estudio. En las inmediaciones de Santiuste no se han diferenciado más de dos niveles, el superior y el inferior (Fig. 2.06).

Aparecen además dos nuevos niveles en los taludes del caz de recarga artificial, asociados a la dinámica del arroyo de la Ermita.

Los depósitos del primer nivel de terrazas (terrazas altas) reposan discordantes sobre los sedimentos margosos y carbonatados de las Facies Cuestas, y se disponen a lo largo de ambos márgenes de los cauces de los ríos Voltoya y Eresma, así como del arroyo de la Ermita, alineadas de acuerdo con una dirección NE-SO. En este nivel se diferencian dos tramos: El primero, de naturaleza conglomerático-arenosa, se depositó a

partir de sistemas fluviales de baja sinuosidad. El segundo, de naturaleza arenoso-lutítica, registra una sedimentación a partir de canales de alta sinuosidad, que son sustituidos en el tiempo por depósitos de llanura de inundación, por el desarrollo de procesos edáficos (costras carbonatadas), y, excepcionalmente, por la instalación de áreas palustres, especialmente en el sector oeste de la *Cubeta*. Así, todo este conjunto define una megasecuencia positiva (registrada en el tamaño de grano) que, en primera instancia, podría marcar una sedimentación en condiciones energéticas decrecientes.

Las terrazas medias y bajas asociadas a los cauces principales están constituidas por gravas de cuarcita y cuarzo, con porcentajes bajos y muy variables de cantos de caliza (Fig. 2.07). En relación a la red secundaria, la litología es diferente, predominando las gravas de cantos de caliza en una matriz limo-arcillosa.

Ni en las terrazas bajas ni en las medias se han detectado rasgos que evidencien una posible actividad tectónica.

Ambos conjuntos de terrazas se han diferenciado por su posición con respecto a los cauces actuales, y por observarse un cambio en el estilo fluvial. La organización interna de los sedimentos en las terrazas medias indican una sedimentación a partir de sistemas de baja sinuosidad (conglomerados con desarrollo de barras transversales, estratificaciones cruzadas en surco, etc.); sin embargo, los sistemas fluviales que generaron las terrazas bajas debieron ser de alta sinuosidad y muy similares a los cursos actuales (Fig. 2.08 a-c).

Los depósitos de llanura de inundación se localizan a lo largo de las márgenes de los ríos e intercalados en la *Cubeta*. En su composición predomina la fracción limo-arcillosa sobre la arena, aunque también incluyen depósitos de desbordamientos constituidos por gravas y arenas. Por su posición estratigráfica, se trata de los depósitos más recientes registrados en relación a la red fluvial actual.

En las Figs. 2.06 a 2.08 se presentan algunos niveles de terrazas diferenciados en los taludes de los cauces fluviales, con sus correspondientes umbrales de separación. Estos corresponden a la zona del Molino del Quemao, en Moraleja de Coca, Estación Saica-Eresma, en Villeguillo, y arroyo de la Ermita, en la zona de la Dehesa Tetuán, en Coca.



Fig. 2.06. Ejemplo de terrazas fosilizadas en la zona de estudio en la margen izquierda del río Voltoya, cerca del Molino del Quemao (Moraleja de Coca). Unidades Superior y Media.



Fig. 2.07. Ejemplo de terrazas fosilizadas en el talud del río Eresma, margen derecha. Inmediaciones de la Estación Saica de Villeguillo. Unidades Media e Inferior.



Figs. 2.08. a) b) y c). Ejemplo de canales de gravas de la Unidad Superior en el Arroyo de la Ermita, Dehesa Tetuán (Coca). Talud del caz de recarga artificial.

Dada la escala de trabajo y las zonificaciones previas realizadas en los antecedentes de acuerdo con la estratigrafía basada en *Unidades Tectosedimentarias* (UTS) para el acuífero de los Arenales (IGME, 1984d; Garrido Megias, 1982), se ha considerado improcedente atribuir a las zonas diferenciadas dentro de la *Cubeta* tal término, empleando sencillamente la notación de “sectores”.

5.3. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL SISTEMA

Con objeto de contextualizar a escala más amplia, cabe citar algunas generalidades del ámbito de actuación extraídas del estudio de los antecedentes.

La Cuenca del Duero es una depresión tectónica rellena por sedimentos de carácter continental, cuya disposición es horizontal o subhorizontal, que únicamente en los bordes de la cuenca pueden aparecer deformados (*Portero et al, 1982*).

Observando la cuenca en su totalidad, se aprecia que la pendiente deposicional aumenta desde aproximadamente el uno por ciento por la zona central, hasta el doce por ciento en las proximidades de las montañas.

En el borde sur, es decir, en el límite meridional de la Unidad de Los Arenales, es donde los sedimentos terciarios apoyados sobre el Paleozoico presentan buzamientos importantes.

Al no existir niveles de despegue paleozoicos y mesozoicos, el material que se asienta sobre ellos (del Paleógeno) se adapta a las deformaciones existentes mediante flexión, fallándose las zonas de charnela.

La zona de estudio presenta unas directrices heredadas de la tectónica regional, como corresponde a su posición semimarginal de una gran cuenca terciaria, con sedimentos claramente diferenciados al menos desde la unidad Paleógena inferior o Preluteciense. En este contexto, son varios los indicios que inducen a pensar en la hipótesis de que la *Cubeta de Santiuste* presenta una geometría y un funcionamiento hidrogeológico condicionado por actividad tectónica en el área.

Algunos de estos indicios son la distribución de los humedales en la zona, guardando una fuerte linealidad; la alineación de las cubetas colmatadas del paleorrelieve (detectadas mediante campañas de prospección geofísica y perforaciones mecánicas); el paralelismo entre formaciones cuaternarias fluviales, ajustándose a lo que parece ser un basculamiento solidario del basamento; el carácter lineal de ciertos tramos de los ríos Voltoya y Eresma en dirección NE-SO; el desarrollo de asimetrías en la red de drenaje, terrazas, etc.

En un contexto más amplio, el primer episodio de deformación reconocido se sitúa a finales del Astaraciense Superior, y se manifiesta por el desarrollo de fracturas normales en el borde de la cuenca y basculamientos hacia las áreas más centrales (*Portero et al, 1983*). Como consecuencia de este episodio de deformación, se desarrolla una discordancia cartográfica entre los depósitos siliciclásticos de Tierra de Campos (Astaraciense Superior), y los depósitos carbonatados y evaporíticos de las Facies Cuestas (Astaraciense Superior-Vallesiense), como se aprecia en determinados sectores de la Cuenca del Duero, así como fallas normales entre los depósitos carbonatados y evaporíticos de las Facies Dueñas (Orleandiense-Astaraciense).

El segundo episodio de deformación se pone de manifiesto por el desarrollo de fracturas y pliegues en los sedimentos que constituyen el techo del relleno Neógeno de

la cuenca, en los techos de las Facies Cuestas y Páramos. La existencia de esos pliegues se conoce desde principios de siglo (*Hernández Pacheco, 1915 y 1923*).

A finales del terciario se produjo un basculamiento de la cuenca hacia el oeste (fase Rodánica o Iberomanchega), dando origen a amplios pliegues, a los que se asocian procesos erosivos “costras clásticas rojas” (*Pérez González, 1979*), recubriendo las depresiones. Esta cubierta, más tarde, será condicionante para la instalación de la red fluvial cuaternaria.



Fig. 2.09. Ejemplo de pliegue encontrado en la zona de estudio en el punto de coordenadas UTM: X=371560 ; Y= 4563164. Si bien podría tratarse de un pliegue sedimentológico o de disolución, su orientación coincide con las principales directrices tectónicas que han actuado sobre el sistema (descritas en el próximo apartado). Coordenadas obtenidas con GPS monofrecuencia.

El profundo encajamiento del nivel de base de los ríos Eresma y Voltoya, y el basculamiento hacia el noreste, induce a pensar en la existencia de un proceso continuado de neotectónica, presente todavía en la actualidad.

Los materiales post-Astaraciense superior están representados por sedimentos siliciclásticos, carbonatados y evaporíticos de origen fluvio-lacustre y lacustre (*Facies Cuestas de Hernández Pacheco, 1915*) y fosilizados por calizas lacustre-palustres. (*Calizas del Páramo, del mismo autor, 1915*).

5.3.1. Análisis de estructuras

En los antecedentes consultados, algunos autores citan la presencia de una serie de lineamientos muy marcados, que podrían ser el reflejo directo, en superficie, de fracturas que afectan al zócalo o basamento del acuífero (MAPA, 1999a).

Para el estudio de este supuesto, y con objeto de determinar la orientación de los principales esfuerzos que han actuado sobre la zona de estudio, se propone una metodología que consta de las siguientes etapas:

1) Determinación de los lineamientos de mayor entidad, que indican las principales direcciones de discontinuidad estructural. Para ello se van a emplear ortoimágenes y fotogramas para su detección. Como técnica adicional a la observación de imágenes actuales, se ha llevado a cabo un análisis del paleorrelieve reconstruido con todos los datos disponibles, bien sean directos (datos de sondeos) o indirectos (datos de campañas de prospección geofísica), con los que se ha simulado una malla o *grid*. Dicho análisis se desarrolla en el Apto. 5.3.2, y está basado en la elaboración de una cobertura digital generada con los valores de la derivada direccional de cada nodo de la malla del paleorrelieve. La técnica, de elaboración propia, realza variaciones bruscas en las pendientes, y permite intuir direcciones de actividad tectónica.

Esta malla ha permitido, además, la elaboración de un mapa de isopacas de la Unidad Arévalo (Fig. 2.28) y la reconstrucción del techo del acuitardo terciario (*Facies Cuestas*) previamente a que fuera tapado o fosilizado por el sistema mixto eólico, fluvial y lagunar, que se implantó a comienzos de la presente Era, y que ha generado el acuífero arenoso cuaternario de la *Cubeta de Santiuste* (Figs. 2.27 y 2.30).

2) Estudio de los resultados de las estructuras menores en campo, a partir de los datos obtenidos en las 11 estaciones mesoestructurales¹ establecidas. En ellas se han realizado mediciones de pequeños planos de falla, generalmente en familias de fracturas ortogonales constituyendo intersecciones tectónicas, venas distensivas rellenas de calcita y depósitos carbonatados, así como lineamientos a escala de afloramiento. Simultáneamente se pretende detectar indicios de actividad neotectónica. En este sentido se han localizado pliegues en un arenero (estación 6), en los que se han medido sus ejes y orientación de los flancos. En las estaciones inventariadas no se han detectado estrías, estilolitos ni otras estructuras más típicas de rocas competentes.

3) Determinación de las principales direcciones de discontinuidad estructural, a partir de los resultados obtenidos hasta ahora.

4) Análisis del funcionamiento de los accidentes supuestos del basamento al someterse a dichos esfuerzos, y cálculo de un elipsoide de deformación teórica que sea coherente con los datos disponibles.

5) Estudio de la coherencia entre las direcciones de fracturación deducidas y las restantes técnicas aplicadas, como las anomalías geomorfológicas o estratigráficas.

¹ En este apartado los términos *estación mesoestructural* o *estación geomecánica* son empleados indistintamente.

5.3.1.1. Estudio de lineamientos por teledetección

Las imágenes procedentes de satélite han sido de gran utilidad para realizar un análisis de lineamientos regionales, ya que ofrecen una visión de conjunto que no poseen las imágenes aéreas convencionales (empleadas para el estudio a escala intermedia y local).

Inicialmente se ha realizado un análisis de la información de dichas imágenes en soporte digital, a fin de discriminar los principales grupos litológicos de la zona de estudio. En primera instancia, parece que pueden identificarse los grandes conjuntos litológicos descritos: la cobertera arenosa cuaternaria de la Fm. Arévalo y las margas, arcillas y yesos de las *Facies Cuestas*. En ambas formaciones se detectan lineamientos de cierta entidad que son descritos más adelante.

5.3.1.2. Estudio de lineamientos por fotointerpretación

El análisis fotogeológico se perfila como una técnica idónea para el estudio de las estructuras mayores, intentando abarcar el mayor período posible de tiempo geológico continuo. El caso más favorable concurre cuando hay presentes estructuras que afectan a los materiales del período neotectónico considerado.

En áreas de baja actividad neotectónica, la presencia de estructuras deformativas en materiales recientes queda muy limitada, por lo que es recomendable el empleo de técnicas adicionales (anomalías geomorfológicas, etc.).

La interpretación de los lineamientos sobre los fotogramas, su representación en rosas de fracturación y el listado de las mediciones se presentan en el Anexo 2.1.

5.3.2. Estudio de las derivadas direccionales del mapa de pendientes del paleorrelieve

Como técnica adicional a la observación de imágenes actuales, se ha propuesto y aplicado una nueva metodología, basada en la observación del relieve, tanto el que hay en la actualidad, como el que había a finales del período terciario.

Esta técnica está basada en el estudio de las **derivadas direccionales del mapa de pendientes del paleorrelieve**. Esta técnica constituye una línea de investigación novedosa de la que no se han encontrado citas bibliográficas.

Esta técnica precisa una reconstrucción previa del paleorrelieve, labor descrita en el Apto. 5.5. Las cartografías generadas y la aplicación del método se ha extraído al anexo 2.3.3, editado en un tomo independiente, con objeto de facilitar la observación simultánea de la memoria y las cartografías representadas.

A tenor de los resultados, se aprecia una gran similitud entre los lineamientos deducidos sobre fotografías actuales y sobre el paleorrelieve. En el sector septentrional predominan los lineamientos de dirección NNO-SSE y en el meridional NE-SO y NS.

La reconstrucción del paleorrelieve cuenta con el inconveniente de su grado de incertidumbre, que es inversamente proporcional a la cantidad de datos disponibles. En este caso la densidad de información resultante para la zona de *Cubeta*² propiamente dicha (42,19 km²) es de **7,44 puntos por km²**, bien sean medidas directas o indirectas (véase los datos de partida en el Anexo 2.2).

La generación de un MDT de relieves pretéritos permite el tratamiento digital de la información, y facilita la detección y medida de la orientación de los principales lineamientos.

Esta técnica se configura como un posible procedimiento para realzar variaciones bruscas en las pendientes, lo que permite intuir direcciones preferentes de actividad tectónica al aplicarse sobre relieves actuales o pretéritos.

5.3.2.1. Resultados

Con todos los datos obtenidos se han elaborado rosas de fracturación que contienen la información deducida empleando las diferentes escalas de observación, etapa previa para el análisis de estructuras.

En las Figs. 2.10 a)-c) y Fig. 2.14 se presentan las rosas correspondientes a todos los lineamientos del sector septentrional, meridional y de toda la zona de estudio respectivamente. En ellas se puede apreciar que existe una gran variación en cuanto a lineamientos se refiere, si se consideran los interpretados en el sector septentrional y meridional.

En el **Sector norte**:

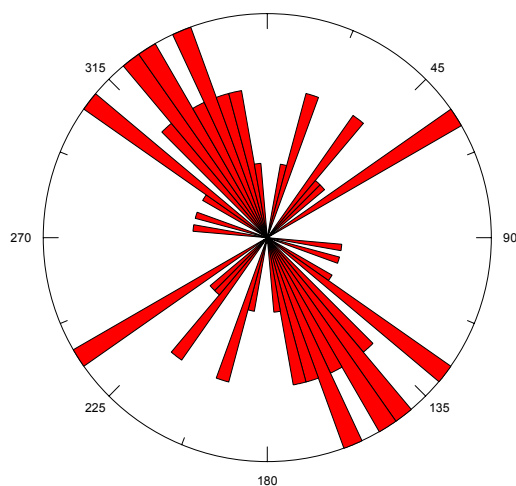
- La orientación preferencial de los lineamientos es la NNO-SSE.
- Secundariamente aparecen estructuras de orientación NO-SE y NE-SO.

En el **Sector sur**:

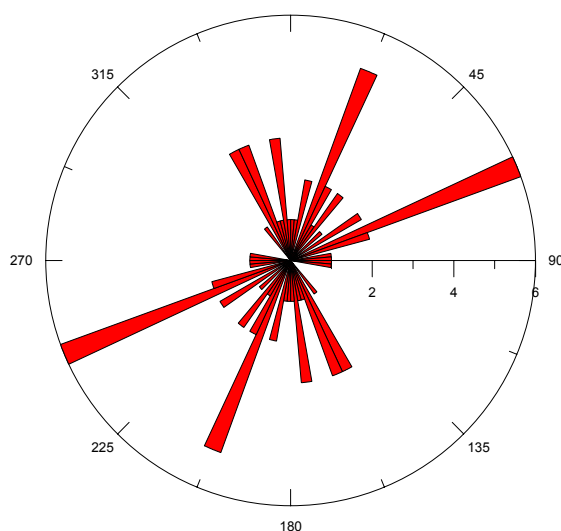
- La orientación preferencial de los lineamientos es la ENE-OSO.
- Secundariamente aparecen estructuras de orientación NE-SO y NNO-SSE.

En principio los indicios apuntan a una discontinuidad estructural que delimita dos bloques del basamento bajo la Cubeta de Santiuste, cuya orientación coincide, en grandes rasgos, con la orientación de los cauces fluviales del río Eresma, en el sector septentrional, y al tramo final antes de la confluencia del Voltoya en el sector meridional.

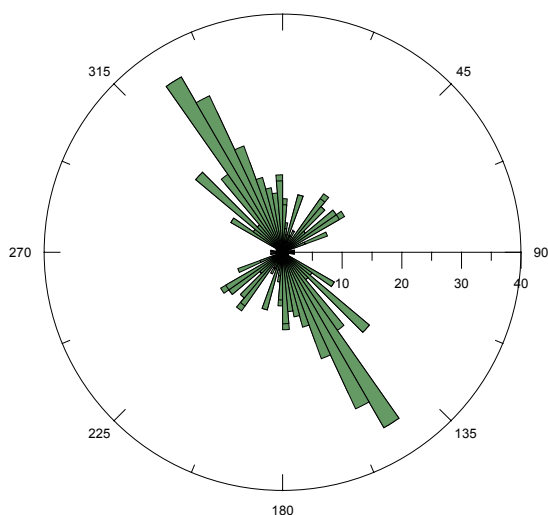
² Se ha adoptado la notación “*Cubeta*” para simplificar la “Cubeta de Santiuste”.



Rosa de fracturación. Sector norte.



Rosa de fracturación. Sector sur.



Rosa de fracturación para la Cubeta de Santiuste deducida de sus lineamientos.

Figs. 2.10. a) - c). Rosas de fracturación correspondientes a todos los lineamientos del sector septentrional, meridional y de toda la zona de estudio respectivamente.

5.3.3. Estudio de estructuras menores e investigación de actividad neotectónica

Una vez posicionadas las estructuras “*de borde*” originadas por paleoesfuerzos, resulta conveniente estudiar el grado de coherencia que presentan las microestructuras con las directrices que han actuado a escala regional.

En áreas como ésta, donde predominan las litologías arenosas, arcillosas y evaporíticas, el primer paso a seguir es discriminar qué estructuras tienen un claro origen tectónico, y cuáles han sido producidas por fenómenos halocinéticos y arcillocinéticos, inducidos por procesos de carga, disolución, variaciones freáticas, etc.

Dada la dificultad para establecer estaciones de toma de datos estructurales en lugares preseleccionados, y debido al carácter de los materiales que cubren la *Cubeta* (arenas eólicas en su mayor parte), se han posicionado de acuerdo con los principales afloramientos de Facies Cuestas con suficiente extensión vertical. De ahí la necesidad de contar con secciones de gran altura, localizadas principalmente en la margen de los cauces fluviales o colinas.

No se han podido tomar datos estructurales directos en las litofacies arenosas superficiales que constituyen las denominadas “*formaciones superficiales de materiales no coherentes ligados directamente a la evolución del relieve actual*”, en las que las mediciones en campo de microestructuras (diaclasado, microfracturación, etc.) son muy difíciles, como corresponde a las características texturales y estructurales de estos materiales.

Se ha realizado el levantamiento de 11 estaciones mesoestructurales en campo, donde se han recogido datos de todas las estructuras menores presentes, como complemento a las medidas efectuadas de lineamientos en foto aérea y ortoimágenes.

Ante la escasez de datos mesoestructurales suficientes para calcular el elipsoide de deformación, las medidas tomadas han sido complementadas con mediciones en los afloramientos de *Calizas del Páramo* más cercanos a la *Cubeta* por el norte (*Páramo 1*).

En estos afloramientos se han medido datos mesoestructurales, tales como pequeños pliegues, planos con diferente color de los materiales (que oscilan entre los pardos y beige, llegando a tonos blanquecinos en los lugares donde se produce una mayor concentración de material carbonático, grisáceos en los afloramientos del sustrato terciario, pardos en láminas ferruginosas), y, en general, en planos con presencia de contrastes importantes en cuanto a variaciones físico-químicas y texturales dentro de las Facies Cuestas. Estos cambios cromáticos parecen haber sido motivados por la circulación de fluidos, procesos de alteración diferencial, relleno de grietas originadas por distensión, etc. No se han encontrado en los planos de distensión rellenos de calcita fibrosa que puedan resultar indicadores de movimientos direccionales.

Los datos han sido interpretados como planos estructurales, ya que presentan una orientación concordante. En muchos casos, se aprecia con claridad unos planos originados por distensión y rellenos de precipitados carbonáticos y ferromangánicos, difícilmente atribuibles a estructuras sedimentarias, ya que la directriz de esfuerzos principales debería haber afectado de manera solidaria a los afloramientos.

También ha facilitado la toma de datos la manifestación de suelos de tipo calcimorfo, con frecuentes concreciones carbonosas, localizados a techo de las secuencias granodecrecientes, ya citados en *IGME, 1992d*.

La totalidad de los datos han sido representados en falsillas de Schmidt, empleando para ello la aplicación *StereoNet for Windows V. 3.03*. La nomenclatura y ubicación de las estaciones geomecánicas o mesoestructurales se presentan en el anexo 2.3 y en la Fig. 2.11.

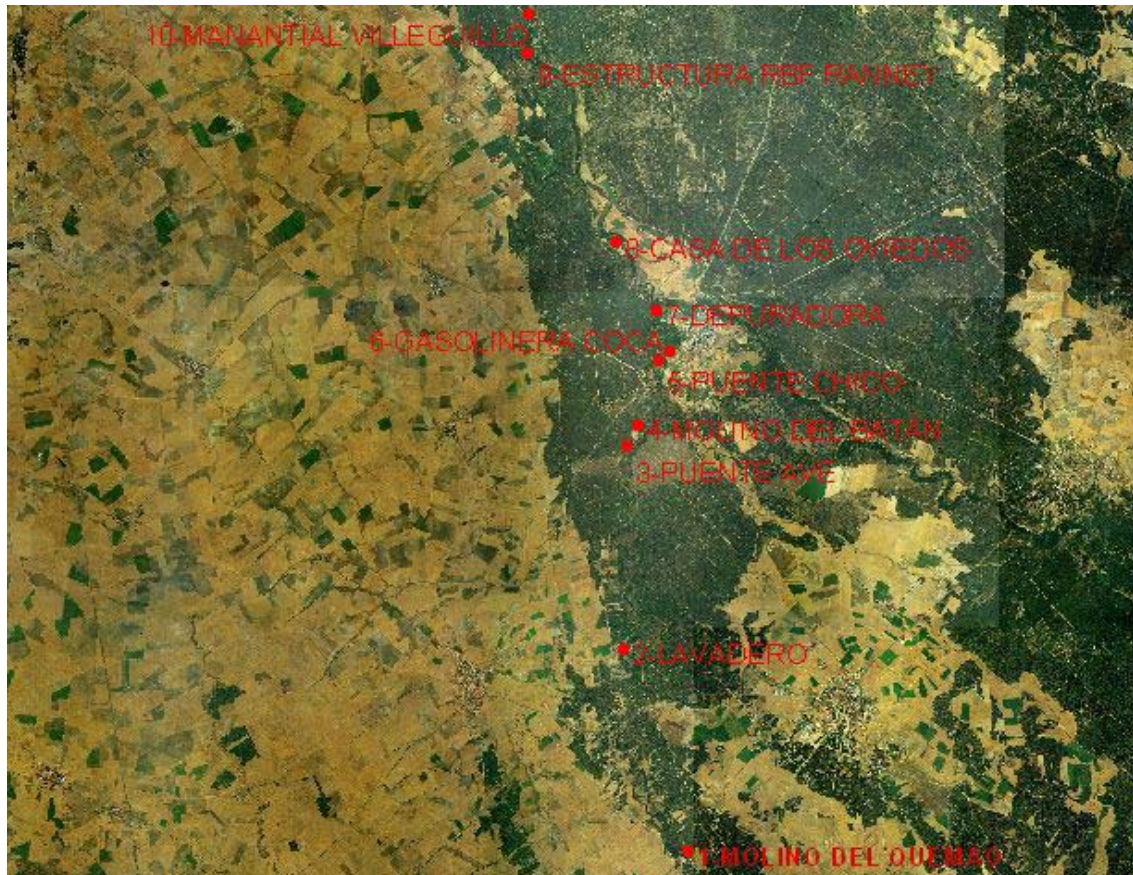


Fig. 2.11. Croquis con la posición de las estaciones geomecánicas a escala 1:130.000 sobre la ortoimagen digital del año 2000.

Los datos estructurales medidos en las estaciones se presentan en el Anexo 2.3.1. En general corresponden a “fallas” medidas en zonas de intersecciones tectónicas (representadas en rojo), grietas distensivas rellenas de cementos carbonatado (en verde) y dos pliegues aislados (en amarillo).

Los datos complementarios han sido tomados en afloramientos rocosos, y corresponden a fallas por lo general.

La notación adoptada para describir la orientación de las discontinuidades estructurales (*sensu lato*) medidas ha sido la de sentido de buzamiento//buzamiento. Por ejemplo, 28//300 quiere decir que la falla buza 28° según los 300, es decir, su dirección es N60O y su buzamiento 28° al noroeste.

En el Anexo 2.3.2 se presenta una “*hoja de contactos*” con un montaje de todas las fotografías de las estaciones geomecánicas descritas.

En cuanto a las fracturas encontradas, cabe destacar las medidas en la estación 7, localizada tras la confluencia de los ríos Eresma y Voltoya. En ella se han tomado tres medidas de fracturas normales ortogonales, con componente direccional y saltos centimétricos, que afectan a las Facies Cuestas. Dada la plasticidad de los materiales, no se han encontrado estrías de fricción, a pesar de haber abierto los planos con espátula y limpiado con pincel.

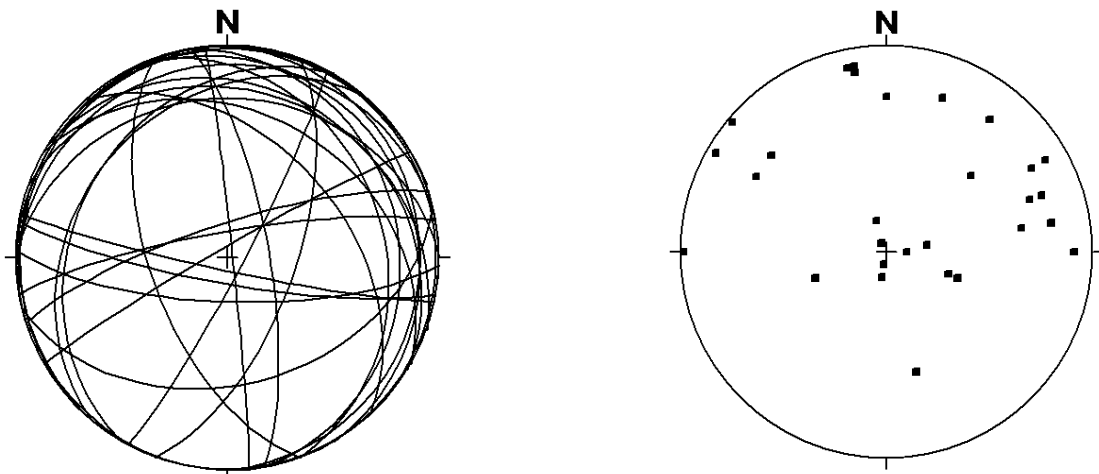
En cuanto a los pliegues, se han realizado medidas en campo de los ejes de los dos únicos pliegues localizados en la zona de estudio (estación 6), con objeto de obtener la orientación de los esfuerzos locales. Los resultados obtenidos son:

- $\delta = 48//44$ (N138E, $i = 44^\circ$ NE).
- $\delta = 38//20$ (N128E, $i = 20^\circ$ NE).

La geometría de estos pliegues es concéntrica y simétrica, por lo que parecen corresponder a procesos de acortamiento tangencial.

Por lo tanto, si estos pliegues son la respuesta a un acortamiento debido a la actuación de esfuerzos compresivos, la orientación media de máxima compresión (δ_1), de acuerdo con las mediciones realizadas en campo, oscilan en torno a N133E (NO-SE), que corresponde con una orientación tardihercínica típica.

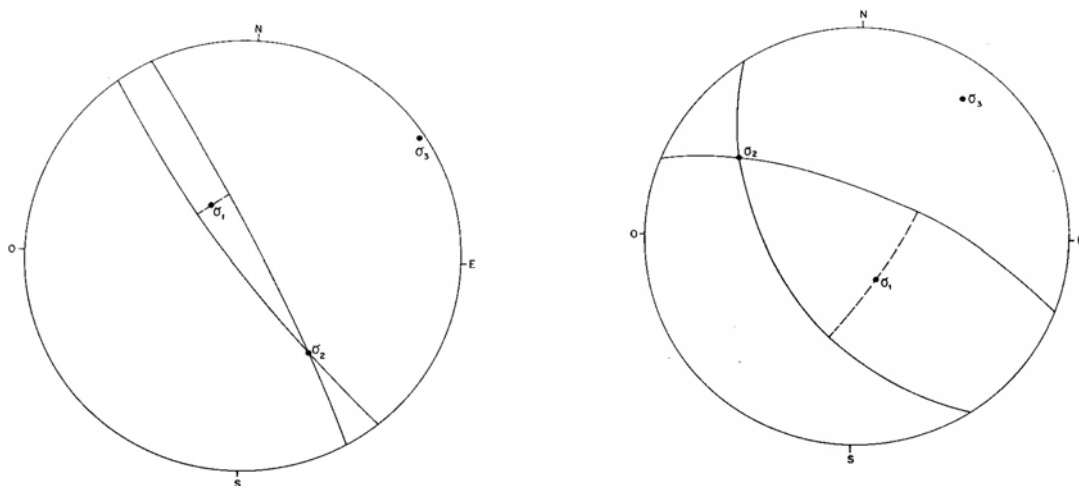
Con los datos obtenidos en cada estación se ha elaborado una falsilla equiareal tipo Schmidt. El mismo procedimiento se ha seguido con la totalidad de los datos estructurales medidos. Las falsillas se presentan individualizadas en la cartografía de la Fig. 2.29, mientras que la representación de los arcos y polos de las estructuras medidas se encuentran en las falsillas de Schmidt de las Figs. 2.12 a y b:



Figs. 2.12 a) y b). Representación de la totalidad de los datos estructurales medidos en campo en falsillas equiareales de Schmidt. Arcos y polos.

En el sector septentrional se han localizado fracturas con desplazamiento normal, cuya agrupación permite diferenciar dos familias, representadas en las estaciones mesoestructurales 7 y 8. A partir de los datos de los dos sistemas conjugados

de fallas normales, se ha deducido la orientación de estos ejes de esfuerzos, empleando para ello el método de los diedros rectos en cada familia, cuyo ángulo de intersección sobre una falsilla de Wulff nos permite deducir la orientación de la dirección de esfuerzos intermedia δ_2 . Dichos valores han sido representados en falsillas equiangulares de *Wulff* mediante la aplicación *Stereonet-intersection*, obteniendo los polos de las direcciones de esfuerzo principales medias (Figs. 2.13 a y b):



Figs. 2.13 a) y b). Estimación de la orientación de los ejes de esfuerzos a partir de los sistemas de fallas normales pertenecientes a la familia 1 y familia 2 respectivamente de las estaciones geomecánicas 7 y 8.

A tenor de los resultados obtenidos, las principales orientaciones tectónicas deducidas de datos mesoestructurales relativas a los ejes principales de esfuerzos son:

- Familia 1 (sentido de buzamiento/buzamiento):
 - Eje de máxima compresión: $\delta_1 = 325/50$
 - Eje intermedio: $\delta_2 = 140/30$
 - Eje de mínima compresión o de extensión: $\delta_3 = 060/05$
- Familia 2:
 - $\delta_1 = 160/60$
 - $\delta_2 = 310/20$
 - $\delta_3 = 040/15$

De acuerdo con estos datos y resultados, se deduce una dirección de extensión NEE-SOO, de acuerdo con el eje δ_3 , y una compresiva ortogonal NNO-SSE, de acuerdo con la orientación del eje δ_1 . Estas directrices son compatibles de acuerdo con los sistemas de análisis poblacional (fallas normales, inversas, dextrales y sinestrales).

Con objeto de estudiar las posibles diferencias entre los sectores septentrional y meridional, se han representados las falsillas estereográficas con la representación de los datos medidos en cada estación mesoestructural en un mapa específico. Esta cartografía recoge, además, las rosas de fracturación ya presentadas y las direcciones de los esfuerzos principales deducidas (Fig. 2.14).



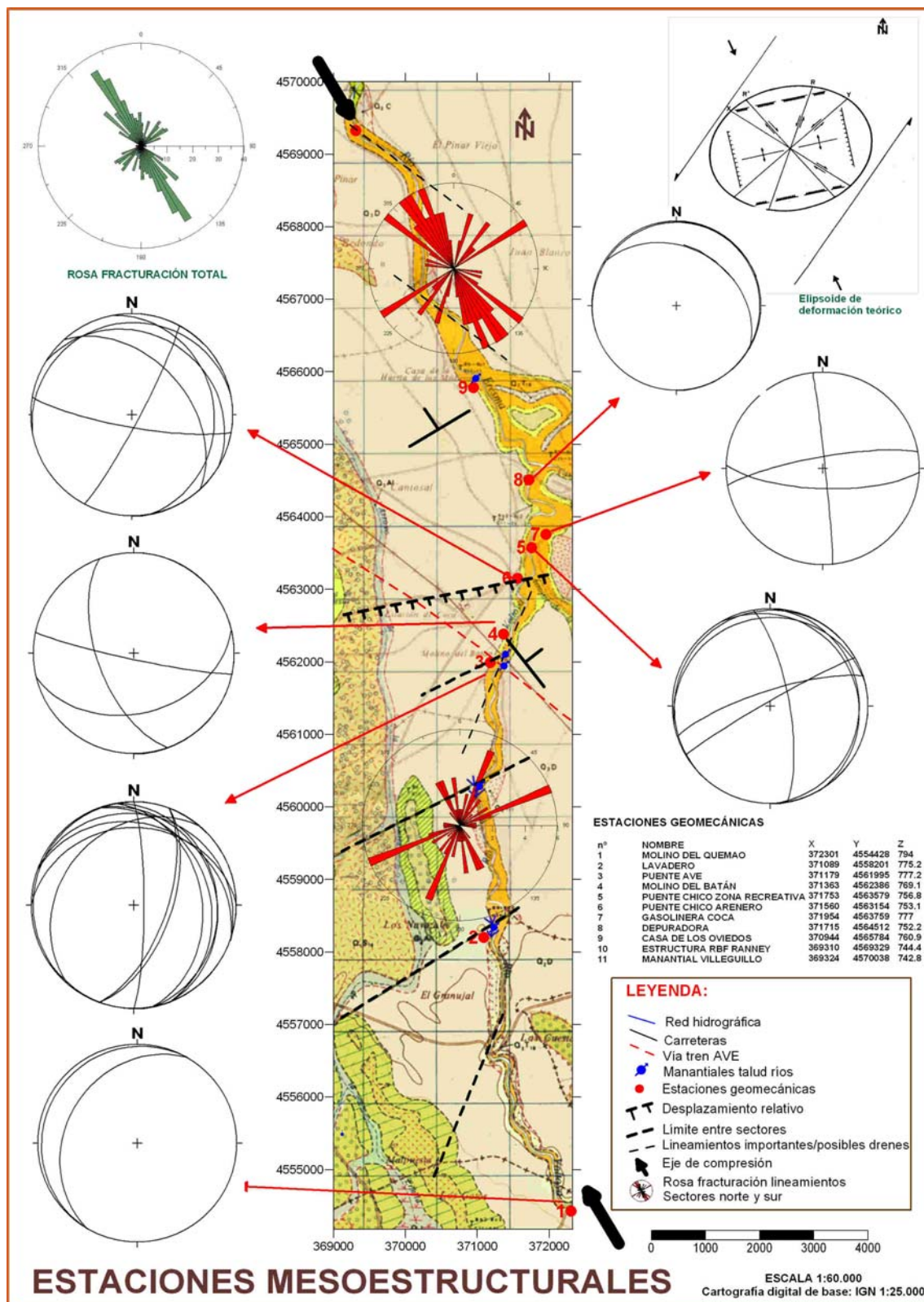


Fig. 2.14. Distribución de las estaciones mesoestructurales y representación de los datos en falsillas de Schmidt. Representación de arcos correspondientes a dirección-buzamiento.



5.3.4. Determinación de las principales direcciones de discontinuidad estructural

Una vez deducidos y atribuidos los mecanismos de deformación principales para cada tipo de estructura, se han sometido a diversos análisis de geología estructural con objeto de reconstruir un posible elipsoide de deformación que refleje la tectónica del sistema, tanto a escala mesoestructural como macroestructural (movimiento relativo de los bloques del zócalo según el contexto geológico regional).

Los datos obtenidos en campo y empleados para la reconstrucción del elipsoide de deformación se adjuntan en el Anexo 2.3.1. La cantidad de datos medidos en las estaciones geomecánicas resulta insuficiente para determinar la orientación de los principales esfuerzos, por tanto, estos han sido complementados con datos obtenidos en las calizas del páramo situadas al norte de la *Cubeta*. Estos datos han sido representados en un diagrama de densidad de estructuras de roseta de fracturación (Fig. 2.15 a).

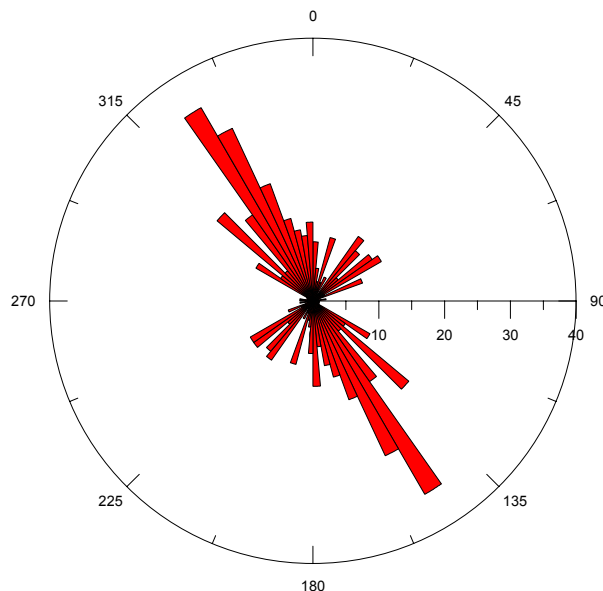


Fig. 2.15 a). Roseta de fracturación de los planos de falla normales y direccionales.

Atendiendo a los datos de forma distribuida en sus diferentes estaciones, se han determinado las direcciones preferentes de plegamiento y fracturación en distintos sectores del área, deduciendo las direcciones de acortamiento congruentes con cada tipo de estructura.

Para ello se utiliza como criterio la presencia de un eje de acortamiento perpendicular a la dirección de plegamiento, y la determinación de los ejes de esfuerzos mediante el método de los diedros rectos. No se ha podido contar con estructuras claramente definitorias del régimen de esfuerzos, como son los estilolitos y las venas de tracción con rellenos fibrosos.

A partir de los datos medidos, en una zona sometida a una dirección de esfuerzo compresivo predominante de orientación δ_1 : N170, el **modelo teórico** y las estructuras resultantes podrían ser del siguiente modo:

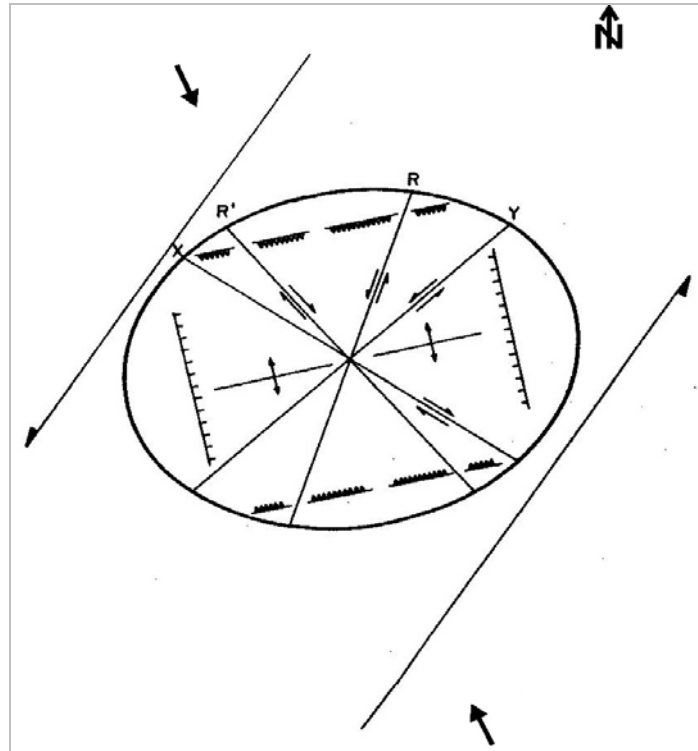


Fig. 2.15 b). Estructuras teóricas en un área sometida a esfuerzos compresivos con orientación N170E.

De este modo, el sistema queda regido por una dirección compresiva predominante de orientación N170E, una dirección de plegamiento perpendicular y presencia de bloques individualizados por supuestas fallas transformantes, posiblemente amoldadas a un graben en el basamento, si bien este supuesto no puede ser constatado con la información disponible.

A tenor de las distintas técnicas empleadas, se constata que las principales direcciones de discontinuidad estructural son:

- Fracturación NNO-SSE y NO-SE.
- Fracturación NNE-SSO.
- Fracturación NE-SO (N40E). Coincide con una de las orientaciones principales de fracturación tardihercínica en la Cuenca del Duero.
- Dirección de compresión según la orientación N128 a 138E (δ_1), ortogonal a la dirección de esfuerzos distensivos N38 a 48E (δ_3).

Estas orientaciones podrían estar relacionadas con el funcionamiento de los accidentes del basamento ante el sistema de esfuerzos que ha operado en la zona de estudio, afectando a las Facies Cuestas. De manera subsiguiente, la sedimentación de la Fm. Arévalo se adaptaría a los condicionantes tectónicos impuestos.

A pesar de que este elipsoide es teórico y resultante de la interacción de las estructuras que habría que encontrar en una zona sometida a un esfuerzo compresivo de

orientación N170, el conocimiento del acuífero nos brinda ciertas particularidades coincidentes, en gran medida, con este elipsoide tectónico teórico:

La zona correspondiente al eje del “anticlinal”, o línea de máxima compresión, correspondería a la divisoria de aguas subterráneas del acuífero.

Según este modelo, la *Cubeta* se encuentra en una zona hundida delimitada bilateralmente en una estructura tipo graben.

Aparentemente existe un sector ligeramente basculado en el sector central de la zona de estudio, con orientación ENE-OSO, coincidente con la cadera de Betaya. Este sector, junto con el pinar del Sanchón, parece corresponder a uno de los bloques individualizados.

Algunos de los lineamientos detectados, especialmente en el sector norte, corresponden, de manera aproximada, con las fracturas de componente direccional. Por el contrario, los lineamientos deducidos en el sector sur difieren entre 10 y 20 grados, aproximadamente, de los principales lineamientos que cabría esperar que se generasen en un sector sometido al sistema de esfuerzos de este elipsoide.

En cuanto al **análisis de la sismicidad**, la ausencia de terremotos en el área de estudio imposibilita contar con una metodología específica para abordar esta cuestión.

No se han detectado paleosismos en toda la zona de estudio. Éstas han sido buscadas con mayor atención en los areneros, al no haber canteras de áridos en la zona. Tampoco se han hallado deslizamientos que puedan ser atribuibles a esta tipología genética. En las encuestas realizadas a ancianos no se ha obtenido ningún testimonio relevante de actividad sísmica.

Para estudiar la presencia de sismos actuales en la zona de estudio o en las proximidades, se ha consultado el catálogo de sismos *Boletín de sismos próximos* del IGN en versión digital (<http://www.geo.ign.es>) de los años 1991 a 2001. El resultado de la consulta indica que no ha habido ningún sismo destacable en la zona de estudio ni en sus inmediaciones durante este período.

También se ha consultado la norma sismorresistente española (RD 997/2002), Anexo 1 (valores de la aceleración sísmica básica, a_b , y del coeficiente de distribución, K , de los términos municipales con $A_b > 0,04$ g, organizado por comunidades autónomas). De acuerdo con esta fuente, la zona es calificada como estable y no indicios de sismicidad.

En consecuencia, no ha habido terremotos en el área de estudio en los años con registro histórico reciente, información a tener en cuenta al realizar evaluaciones de impacto ambiental de los nuevos dispositivos/estructuras de recarga artificial.

Tampoco se han detectado argumentos tectónicos cuaternarios sólidos, salvo dos pliegues en la Formación Arévalo, los cuales, a pesar de que su orientación es coherente con el modelo de esfuerzos, su aspecto simétrico es típico de pliegues sinsedimentarios.

Además de las técnicas puramente estructuralistas, se han aplicado otros procedimientos para la investigación de la actividad neotectónica en el sistema.

5.4. RASGOS GEOMORFOLÓGICOS INDICATIVOS DE ACTIVIDAD TECTÓNICA

Tradicionalmente se ha considerado que las deformaciones que afectan bien a los materiales, o bien a las formas que se relacionan con la historia del vaciado de las cuencas, son de edad reciente. Por tanto, su marco cronológico puede establecerse a partir de las secuencias de niveles y procesos morfogenéticos acaecidos en la región.

Así, una de las metodologías más útiles para realizar un análisis de la actividad tectónica cuaternaria es el análisis de las anomalías geomorfológicas.

Este hecho parte del principio de que los procesos morfogenéticos han tenido su desarrollo desde el Plioceno hasta la actualidad, y el inicio de la incisión fluvial por desarrollo de redes de drenaje exorreicas no puede ser más antiguo, situándose en el mismo punto temporal.

Se han detectado en el sistema ciertos rasgos geomorfológicos indicativos de actividad tectónica que puede ser considerada reciente, tanto por afectar a depósitos superficiales como por su incidencia en las formas del relieve. Algunos de estos rasgos son:

- La existencia de humedales en zonas de drenaje. Los humedales desecados en el sector norte de la *Cubeta* parecen estar adaptados a una cierta movilidad del sustrato en la vertical.
- Zonas del acuífero que funcionan como drenes. La existencia de depósitos cuaternarios adaptándose al paleorrelieve terciario aporta indicios importantes acerca de las directrices tectónicas Postastaracienses. Los drenes detectados suelen ser coincidentes con la dirección de los afloramientos de materiales cuaternarios que presentan cierta linealidad, descritos en el Apto. previo (sedimentología).
- Distribución de humedales y cubetas fosilizadas coincidentes con accidentes estructurales. La observación del mapa de isopacas y la distribución de los humedales indica que tanto las “paleocubetas” como los bodones se encuentran alineados espacialmente.

Además de estos rasgos, la influencia tectónica ha dejado señales patentes en el trazado de la red hidrográfica.

Al estudiar una serie de terrazas se pueden observar cambios en el estilo fluvial (meandriforme a trenzado) que al ser analizadas a lo largo de un trayecto revelan su carácter local y dan identificación de movimientos puntuales de elevación o subsidencia (*Burnett y Schumm, 1983*).

Por otra parte, cambios bruscos en las paleocorrientes indican modificaciones súbitas del trazado de los cauces y pueden ser también criterio de una posible actividad tectónica, siempre que se puedan descartar otras causas como capturas. Otro posible indicador de movimientos tectónicos es el desplazamiento de los cauces en un sentido preferente hacia posiciones anómalas.

Todos estos criterios son sumamente interpretativos, por lo que no pueden ser utilizados como criterio exclusivo en la determinación de una posible actividad tectónica.

De acuerdo con la base teórica expuesta, se ha desarrollado una metodología de trabajo basada en la datación de las formas y los depósitos mediante su posición topográfica con respecto al cauce activo. Su correlación se ha realizado a partir de su posición con respecto a las cotas topográficas.

Los principales criterios geomorfológicos que indican actividad tectónica, según *Goy et al, 1988*, son:

- 1) Criterios informativos de las tasas de movimiento.
- 2) Criterios indicadores de la existencia de actividad.
- 3) Criterios para reconocimiento y evaluación de la actividad tectónica y grado de deformación.

5.4.1. Criterios informativos sobre las tasas de movimiento

De los elementos geomorfológicos que integran este grupo en el área de estudio, nos hemos centrado en el análisis de las superficies de erosión y de las formaciones superficiales que aparecen deformadas y basculadas. En realidad, se trata más de comprobar la presencia de los criterios que en determinar su *tasas*.

Las superficies de erosión han sido detectadas en afloramientos de Facies Cuestas que delimitan la Cubeta de Santiuste por el oeste, y en afloramientos puntuales en la misma *Cubeta*, en concreto una colina margosa en la zona conocida como Cuerno de la Revilla.

Las formaciones que manifiestan mayor basculamiento se presentan en las terrazas de los cauces fluviales.

Con los datos de campo resulta inviable determinar dichas *tasas*, dada la carencia de una serie histórica suficientemente larga.

5.4.2. Criterios indicadores de la existencia de actividad

Entre los criterios que únicamente nos indican una existencia de actividad tectónica, el análisis se ha centrado en la geomorfología de las colinas terciarias que delimitan a la *Cubeta* por el oeste, y una única colina margosa que la disecciona en dos ramales Cuerno de la Revilla.

También en las vertientes y valles que puedan estar relacionados con accidentes tectónicos. Así mismo, se ha analizado la disposición geométrica y espacial de las formaciones superficiales y subterráneas relacionadas con accidentes, y las anomalías

relacionadas con la red fluvial (capturas, confluencias, formación de áreas endorreicas y desplazamientos de los canales).

5.4.3. Criterios para reconocimiento y evaluación de la tectónica y deformación

En cuanto a los criterios de reconocimiento de tectónica reciente a nivel regional, se ha empleado la técnica del análisis de índices geomorfológicos como criterio cuantitativo, y la detección de anomalías geomorfológicas como cualitativo.

5.4.3.1. Índices geomorfológicos

Los **índices geomorfológicos** son herramientas útiles para evaluar tectónica reciente, ya que proporcionan una rápida visión de zonas específicas de una región que se está ajustando a unas pautas relativamente rápidas de deformación tectónica, pudiendo ser calculados de una forma sencilla a partir de la información geográfica georreferenciada.

Para el empleo de los índices es preciso contar con ciertos datos hidrológicos, especialmente de tipo topográfico:

- CAUCES FLUVIALES PRINCIPALES:

- Zona de estudio: Desde la ordenada UTM 4555000 hasta la ordenada 4571000.
- Cota máxima **Voltoya**: 794,1 m.
- Cota mínima río **Eresma**: 730,7 m.
- Diferencia de elevación total: 63,4 m.
- Cota confluencia: 749,0 m.
- Diferencia de elevación río Voltoya: 45,1 m.
- Diferencia de elevación río Eresma: 18,3 m.
- Longitud cauce Voltoya: 12.358 m
- Longitud cauce Eresma: 8.764 m
- Longitud total: 21.122 m
- Distancia entre extremos del río Voltoya en la zona de estudio: 9.350 m
- Distancia entre extremos del río Voltoya en la zona de estudio: 8.149 m
- Distancia total: 17.499 m
- Índice sinuosidad Voltoya = 1,32
- Índice sinuosidad Eresma = 1,08
- Gradiente Voltoya = $45,1/12.358 = 0,0036 = 3,6 \text{ ‰}$
- Gradiente Eresma = $18,3/8.764 = 0,0020 = 2 \text{ ‰}$

- CAZ DE RECARGA / ARROYO DE LA ERMITA:



- Cota de la toma de agua (punto de transferencia): 814 m.
- Cota cabecera caz de recarga artificial:
- Diferencia de elevación: 30 m.
- Longitud: 10,7 km
- Gradiente= 2,8 ‰.

Nota: Todas las cotas Z han sido obtenidas a partir del MDT de la JCL de un metro de precisión.

Los índices más útiles son los relacionados con los procesos erosionales y deposicionales asociados a sistemas fluviales (*Keller, 1986*).

Los elegidos y aplicados en este estudio son:

- Índice gradiente del Talveg (“Stream gradiente Index”) S.L. (*Hack, 1973*).
- Índice de sinuosidad de escarpes (*Bull & McFadden, 1977*).
- Relación anchura del fondo de valle/altura del valle (*Bull, 1977*).

- **Índice de gradiente del Talveg (“Stream gradiente Index”) SL (*Hack, 1973*)**

Tiene la expresión matemática:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L$$

Donde:

- SL es el índice de gradiente del Talveg.
- $\Delta H / \Delta L$ es el gradiente del tramo de río o arroyo utilizado, siendo ΔH el incremento de cotas que se produce en el lecho del tramo, y ΔL es la longitud del tramo.
- L es la longitud total del canal desde su divisoria de aguas hasta el centro del tramo utilizado. Se ha empleado en el cálculo intervalos de 10 metros.

Este índice ha sido elegido debido a que es altamente sensible a movimientos tectónicos verticales, aunque hay que tener en cuenta que también es sensible a la naturaleza de las rocas (resistencia a la erosión). En nuestro caso este problema no es importante, debido al escaso contraste litológico existente en la zona de estudio. Asimismo, hay que considerar que el índice es insensible a movimientos tectónicos direccionales con escasa componente vertical. Por lo tanto, valores anómalamente altos de SL en rocas de resistencia baja o uniforme es un posible indicador de tectónica activa vertical (*Keller, 1986*).

Los cálculos se han realizado desglosando los cauces en tramos de aproximadamente 1 km, tomando medidas en puntos situados aproximadamente a 100, 200 y 300 metros a cada lado del cauce, y calculado las cotas mediante la intersección con la malla generada con el MDT de un metro de resolución. Posteriormente se han realizado esquemas de isovalores con un intervalo entre curvas variable, si bien a la representación final se la ha dado un espaciado de 25 unidades SL (en adelante uSL).

En el Anexo 2.3.3 se presentan las coordenadas de los puntos seleccionados, los parámetros necesarios para el cálculo del SL y el valor resultante. La estructura de la tabla es:

- X, Y y Z. Coordenadas UTM de los puntos tomados a 100, 200 y 300 metros, aproximadamente, del cauce en ambas márgenes.
- Z Talveg. Coordenada del Talveg en el perfil, en metros sobre el nivel del mar.
- Hn. Diferencia de altura para cada punto con respecto al anterior.
- L n. Distancia aproximada del punto de medida al talveg en cada perfil.
- $I Hn / I Ln$. Gradiente consecutivo entre los puntos correlativos.
- L. Factor L o distancia del perfil a la divisoria de aguas.
- SL. Índice de gradiente del Talveg.

En la Fig. 2.16 se presenta la posición de los puntos donde se ha calculado el índice de gradiente del Talveg (SL), y las isolíneas de resultados.

Los resultados oscilan en los distintos sectores. En el río Voltoya, con 13 perfiles de seis puntos de medida (además del de Talveg), los índices de gradiente oscilan entre 3 y 310 unidades SL, aumentando ligeramente hacia el norte (aguas abajo), como corresponde a áreas tectónicamente estables (*Keller, 1986*). La mediana es de 41,40 unidades SL, y la media de 71,93 uSL.

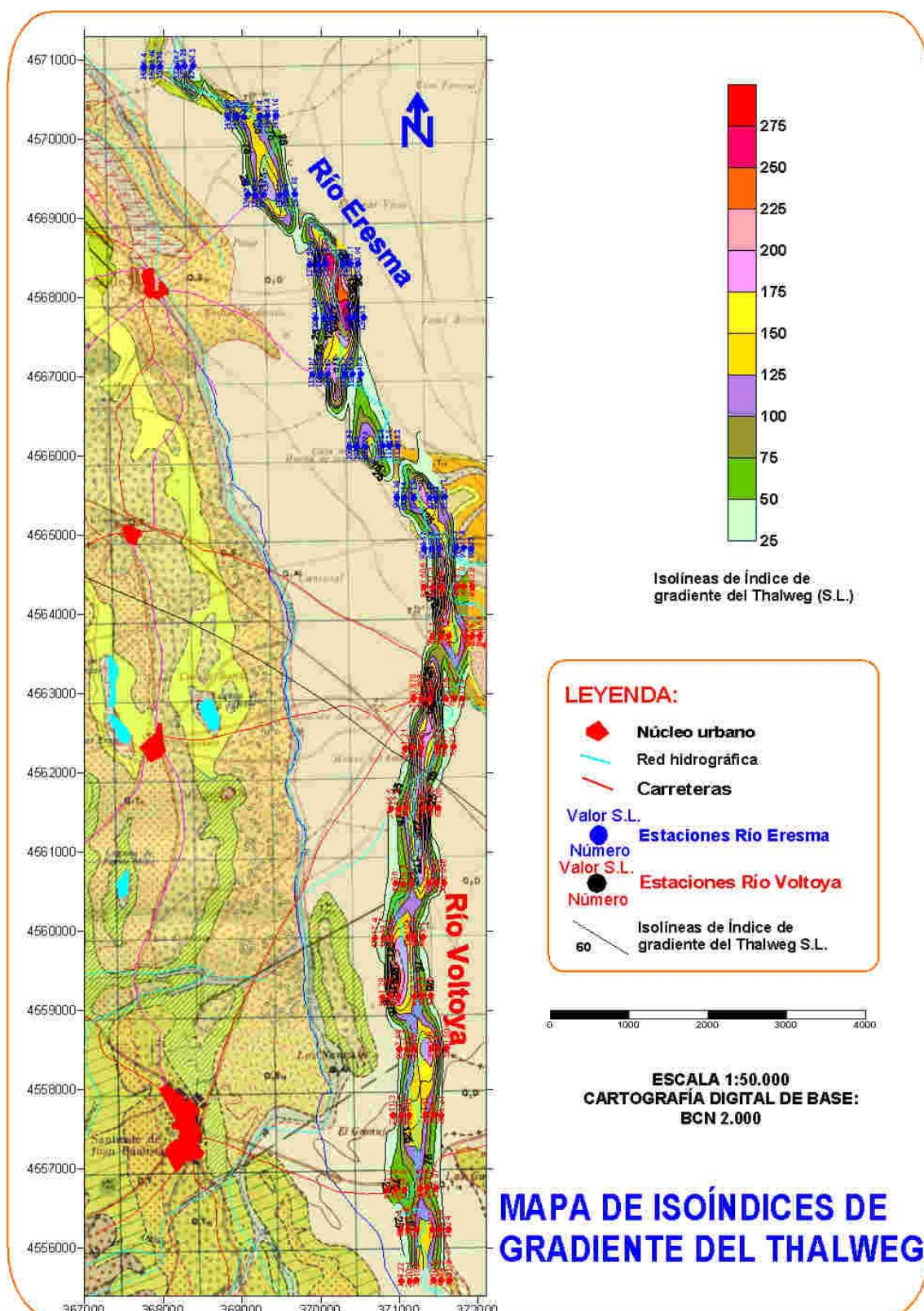
Los valores más altos se agrupan a la altura de la cacera de Betaya, Molino del Batán y puente del AVE, en el sector central, donde el cauce presenta una inflexión hacia el NE, con valores de hasta 225, así como en el Cuerno de la Revilla (frente a la loma en la que afloran Facies Cuestas), con valores similares. Contrastando estos resultados con los obtenidos en áreas tectónicamente activas (*Hack, 1973; Keller, 1986*), se puede deducir que los materiales son más resistentes a la erosión en este tramo, que este sector ha experimentado movimientos verticales ascendentes o ambas cosas. En caso de experimentar ascensos por tectónica compresiva, estos han sido bajos, ya que hay una diferencia en el valor de SL en ambas márgenes entre 15 y 75 uSL, mientras que en zonas tectónicamente activas estas diferencias sobrepasan las 100 unidades (*Keller, 1986*).

La asimetría en la distribución de isolíneas indica una desviación del cauce hacia el NE, como posible respuesta a la elevación y basculamiento hacia el NE del sustrato en los sectores citados.

En el río Eresma se ha aplicado una metodología similar, con toma de medidas en nueve perfiles con seis puntos cada uno (además del de Talveg).

Se han obtenido resultados que oscilan entre 0,3 y 352,8 uSL, que aumentan aguas abajo y son mayores en la margen derecha (Este) que en la izquierda. La mediana es de 36,3 uSL y la media de 80,71. Este proceso puede ser indicativo de un encajamiento remontante y/o de una ligera elevación de la margen derecha, especialmente al este de Villeguillo, donde se registran los valores máximos de la *Cubeta*, y al noreste, con valores de hasta 200 uSL.

Fig. 2.16. Posición de los puntos empleados para el cálculo del índice de gradiente del Talveg (SL), y cartografía de isovalores del índice de gradiente del Talveg (página siguiente).





El tratamiento estadístico de todos los datos desprende unos valores de 36,86 de mediana y 75,58 de media, valores que pueden considerarse altos para la Cuenca del Duero, donde algunos resultados sectoriales bibliográficos oscilan en torno a 50 uSL (*Goy et al, 1988*).

Los núcleos de mayor índice de anomalía geomorfológica, y por ende, de mayor actividad tectónica, corresponde a las zonas mencionadas. Se presentan con colores cálidos en la cartografía de la Fig. 2.35.

Se ha intentado realizar un cálculo similar al arroyo de la Ermita, ya que presenta rasgos anómalos, como son el desarrollo asimétrico de terrazas y su trazado rectilíneo con orientación NNO-SSE. Las escasas diferencias de cotas en la *Cubeta* ha impedido obtener resultados coherentes incluso con un MDT de un metro de resolución, por lo que sería preciso realizar estudios de microtopografía.

- **Índice de sinuosidad de escarpes (*Bull & McFadden, 1977*)**

Se define mediante la expresión matemática:

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s$$

Donde:

- L_{mf} : longitud del escarpe medida a lo largo de la articulación del piedemonte.
- L_s : longitud del escarpe medida en línea recta.

Este índice refleja la tendencia al levantamiento para mantener el carácter rectilíneo de un escarpe que coincide con una estructura tectónica, mientras que la acción de los procesos fluviales y de ladera tienden a producir escarpes sinuosos. Por lo tanto, valores de S_{mf} cercanos a 1 indican actividad tectónica reciente (escarpes muy rectos), mientras que valores mayores corresponden a escarpes sinuosos, donde los procesos fluviales y de ladera han actuado sin interferencia de movimientos verticales, indicando tranquilidad tectónica.

En función de los valores de S_{mf} , se definen tres clases de zonas (*Bull & McFadden, 1977*):

- Zonas clase 1: $S_{mf} = 1,0-1,6$ (Zonas con tectónica activa).
- Zonas clase 2: $S_{mf} = 1,4-3,0$ (Zonas con tectónica moderada).
- Zonas clase 3: $S_{mf} = 1,8-7$ (Zonas inactivas).

En este estudio se ha realizado un único cálculo de este índice para cada cauce principal, tomando para ello medidas en gabinete sobre la ortoimagen georreferenciada con un GIS tipo A/V. El índice de sinuosidad obtenido es de:

- Índice sinuosidad Voltoya = 1,32
- Índice sinuosidad Eresma = 1,08

Según esto, ambos corresponden a la clase 1 (zonas con tectónica activa). Hay que tener presente que el índice Smf fue definido en base a grandes frentes montañosos ampliamente pedimentados en climas desérticos, lo cual no se cumple en nuestra zona de estudio. No obstante, se ha calculado con el fin de poder contrastarlo con el resto de los índices, especialmente el Vf.

- **Relación anchura del fondo de valle/altura del valle (*Bull, 1977*)**

Tiene la siguiente expresión matemática:

$$Vf = 2Vfw / (Eld - Esc) + (Erd - Esc)$$

Donde:

- Vfw es la anchura del fondo del valle en el punto de medida.
- Eld y Erd son las cotas de la divisoria de aguas en la margen izquierda y derecha respectivamente.
- Esc es la cota media del fondo de valle en el punto de medida.

El punto de medida recomendado para la toma de datos está situado a 1 km aguas arriba del escarpe (*Bull & McFadden, 1977*), recomendación que se ha seguido cuando ha sido posible, evitando así distorsiones en los resultados por distintas pautas de encajamiento.

Éste índice proporciona información sobre si un curso fluvial se está encajando activamente (dominado por la influencia de un descenso del nivel de base en algún punto aguas abajo), o si primordialmente está erosionando lateralmente sus márgenes. Así, valores altos de Vf (mayores de uno) representan valles mucho más anchos que profundos, pudiéndoles asignar a las zonas de clase 2 ó 3, y valores de Vf muy bajos (menores de uno) indican encajamientos activos, representando valles con morfología en V en respuesta a movimientos tectónicos, y por tanto, asimilables a zonas de clase 1 (*Bull & McFadden, 1977*).

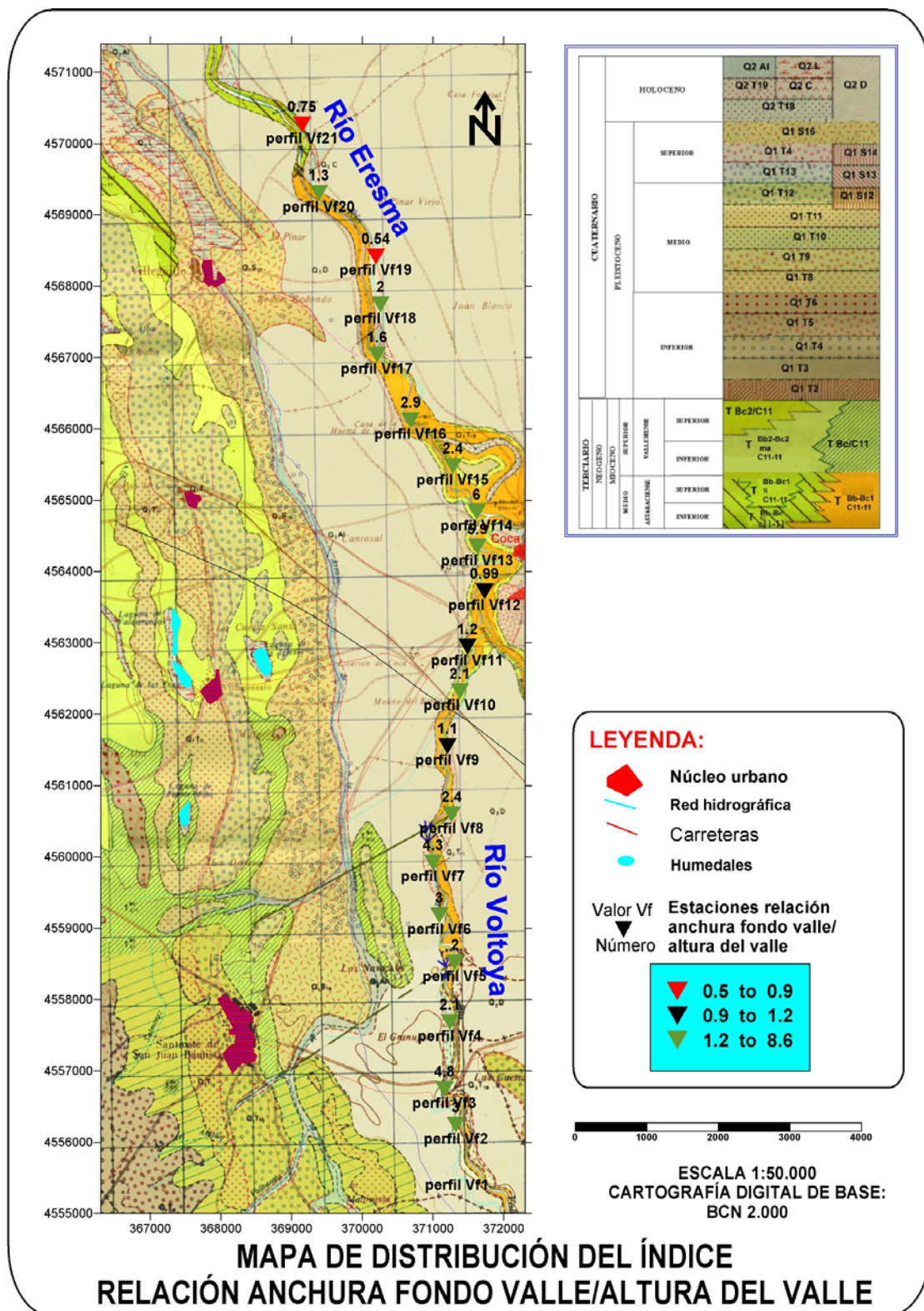
Los índices de la fórmula anterior han sido calculados para los perfiles donde fueron determinados los índices SL.

Aplicando el criterio de los autores citados, cada índice se ha medido un kilómetro aguas arriba del cauce. Ya que las estaciones distaban aproximadamente 1 km, la medida de los parámetros de Vf en el perfil SL 1 es la empleada en el cálculo para el perfil SL 2, y así respectivamente. Los valores obtenidos se presentan en el Anexo 2.3.3, en la que aparecen las coordenadas UTM X, Y y Z de los puntos, las medidas de Eld, Esc y Erd así como la anchura del fondo del valle en cada perfil (VfW). Con estos datos se ha calculado el índice Vf.

El análisis estadístico de los datos indica un valor mínimo de 0,53 m en la zona septentrional y máximo de 6,0 m en la confluencia de los ríos Voltoya y Eresma. La mediana es 2,1 m y la media 2,8 m, con un coeficiente de variación de 0,71. Con los datos obtenidos se ha elaborado una cartografía donde se muestra la distribución espacial de los valores obtenidos (Fig. 2.17).

Fig. 2.17. Mapa de distribución del índice relación anchura fondo valle/altura del valle (página siguiente).







En esta cartografía se han establecido tres clases de acuerdo con la interpretación del índice Vf. En rojo se muestran las zonas que, según este indicador, presentan mayor actividad tectónica (Clase 1), localizadas en el sector septentrional de la zona de estudio, en la margen derecha del río Eresma, especialmente al este de Villeguillo, donde el índice Vf alcanza un valor de 0,54 (dimensiones longitud) en las inmediaciones del sondeo Ranney de captación de aguas del río Eresma para el sistema de tratamiento y eliminación de arsénico. El siguiente valor más alto se encuentra al NE de Villeguillo, donde se registra un índice de 0,75 metros.

Entre los perfiles 9 y 12 se presentan los valores más cercanos a 1, correspondientes a la Clase 2 de *Bull & McFadden*, que corresponde a zonas de posible actividad. Estos quedan localizados en la confluencia del río Voltoya con el Arroyo Balisa, donde se registra el meandro de mayor curvatura de la zona, y en las inmediaciones del puente del AVE Madrid-Valladolid sobre el río Voltoya y el antiguo Puente de Hierro, junto a la desembocadura de la cadera de Betaya.

El hecho de coincidir los valores más bajos con aquellas zonas en las que hay afloramientos de Facies Cuestas en los escarpes induce a dudar en la fiabilidad del indicador, al ser variable la resistencia a la erosión entre los materiales de las Formaciones Arévalo y Cuestas, si bien estos afloramientos coincidirían con la zona de compresión máxima, en cuyo caso resultaría natural la presencia de estas secciones y el encajamiento del río en un sustrato margoso (véanse las Figs. 2.29 y 2.36).

Los valores más bajos se localizan junto al casco urbano de Coca por el norte, en la confluencia de los ríos Voltoya y Eresma (Prado Cerrado).

5.4.3.2. *Anomalías geomorfológicas*

Como **criterio adicional** para determinar la influencia de movimientos tectónicos en el sistema, se ha adoptado el método cualitativo de las **anomalías geomorfológicas**. Se ha prestado especial atención a las relacionadas con las formas fluviales, al presentar secciones de gran longitud y altura y constituir casi la totalidad de afloramientos de Facies Cuestas en el sistema.

Las **anomalías geomorfológicas** consisten en asimetrías en la distribución de la red de drenaje, en el número de terrazas y en la forma de los valles (*Garrido-Mejías, 1982*).

Todas estas asimetrías constituyen verdaderas anomalías porque el mayor número de terrazas y las pendientes más bajas de los valles se localizan en el margen opuesto a la pendiente general, que es hacia el NE.

Ambos tipos son desarrollados a continuación.

- **Estudio de la red de drenaje y detección de asimetrías en su distribución (*Garrido-Mejías, 1982*)**

En esta sección nos centraremos en los rasgos morfológicos más representativos de la red de drenaje, prestando especial atención a todos los aspectos relacionados con la red fluvial actual, como son las terrazas fluviales y los depósitos de llanura de inundación.

En el acuífero de Los Arenales es frecuente apreciar ríos con el trazado rectilíneo, diferencias litológicas en ambas orillas, discordancias en los depósitos, e incluso fallas en los escarpes. Estos hechos evidencian la existencia de reajustes tectónicos, gran parte de ellos datados a la transición entre el Eoceno y el Mioceno, atribuibles a las fases Castellana y Neocastellana (*IGME, 1982d*).

A partir del Plioceno se produce el basculamiento general de la cuenca hacia el oeste, lo que supone el fin del endorreismo y la instalación de la red fluvial con salida al Atlántico.

El trazado de los principales cursos fluviales de la zona de estudio es sinuoso y meandriforme, con elevado índice de sinuosidad (*MAPA, 1999b*), al discurrir por una zona de escasa pendiente. A pesar de ello, la fisiografía del curso de los ríos Eresma y Voltoya aporta información importante de cómo ha influido la tectónica en el área.

El análisis de la red hidrográfica se ha realizado a partir de mapas topográficos a escala 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército (Serie L); de mapas topográficos a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional; de las fotografías aéreas convencionales a escala 1:33.000, y de la ortoimagen digital a escala 1:15.000, lo que propicia distintas escalas de estudio e interpretación.

La morfología general de la red de drenaje es de carácter mixto, entre los tipos dendrítico y paralelo. Esta configuración parece ajustarse, por un lado, a la homogeneidad litológica y estructural del área, y, por otro, a la influencia de una serie de accidentes paralelos, al basculamiento de la sucesión miocena al NE y a movimientos en la vertical.

Con todo, la influencia de la tectónica en la instalación de la red de drenaje comienza a inferirse a partir del análisis de los cauces.

El trazado de los ríos Voltoya y Eresma es sinuoso, con una sinuosidad media de primer orden (es decir, la longitud del cauce (L) partido por la distancia entre sus extremos (D) desprende una relación de 1,32 para el trazado del río Voltoya en la zona de estudio, y de 1,08 para el Eresma, resultando una media de 1,21 para el trazado total.

Los radios de curvatura son variables entre 750 m y 8 km. Se aprecia además, un “codo de captura” desarrollado en la confluencia de ambos que, probablemente, responde a un proceso de erosión remontante, corrigiendo así un trazado más energético.

Ambos ríos presentan un fuerte encajamiento, alcanzando 50 metros en la vertical, de forma que el nivel de base discurre sobre facies de la Formación Cuestas en gran parte del tramo. La causa es atribuida tradicionalmente al levantamiento de un bloque del basamento en la zona meridional de la cuenca (*MAPA, 1999a*), si bien los datos posteriores apuntan a un levantamiento del bloque septentrional, donde el río discurre encajado en las facies Cuestas, y a un hundimiento del meridional (el Voltoya discurre encajado en facies de la Unidad Arévalo en el extremo sur de la *Cubeta*).

Sus terrazas presentan distribución asimétrica y se encuentran escasamente desarrolladas.

En la Fig. 2.18 se representa el trazado de la red hidrográfica en la zona de estudio, excluyendo los tributarios de segundo orden, a escala 1:140.000.

La orientación es discordante entre ambos cauces. El río Voltoya discurre en dirección prácticamente norte-sur, hasta el pinar del Sanchón. En esta zona, coincidiendo con el dren del Molino del Batán y el extremo norte del afloramiento de margas del Cuerno de la Revilla, presenta una inflexión hacia el este, adquiriendo una nueva orientación SSO-NNE (N13E). Este trazado es menos sinuoso y se encaja fuertemente en Facies Cuestas, hasta su desembocadura en el río Eresma, junto a la localidad de Coca. A este respecto, cabe destacar que los tramos de orientación NE-SO son más rectilíneos que los restantes, lo que induce a pensar que esta orientación podría corresponder a una dirección de basculamiento hacia el noreste.

El río Eresma presenta una orientación NNO-SSE (N26O), acorde con los principales lineamientos de la zona de estudio. Los meandros presentan tramos más rectilíneos en la orientación NO-SE.

En contraposición a los cauces principales, el arroyo de la Ermita y el del Caño siguen líneas rectilíneas y subparalelas a los ríos Voltoya y Eresma, presentando, además, una marcada asimetría en el drenaje y en la distribución de sus terrazas.

Para realizar esta afirmación se ha llevado a cabo una observación minuciosa del trazado de los ríos en un Sistema de Información Geográfica (GIS), empleando elementos automáticos para georreferenciar la generatriz de estos tramos.

Además de los índices mencionados y del alto grado de encajamiento, se ha prestado especial interés hacia las formas fluviales, que pueden ser consideradas indicadores de actividad neotectónica, como son las capturas, confluencias, formación de áreas endorreicas y desplazamientos de los canales.

En general, se aprecia una progresiva disminución de sus llanuras de inundación, con **capturas** en “*cuello de buey*”, como ocurre en el río Eresma, en Prado Cerrado, al norte de Coca, inmediatamente después de la confluencia con el Voltoya, indicando procesos de aceleración energética notable combinados con procesos de erosión remontante. Una nueva captura se aprecia en Suertes del Pinar, en Moraleja de Coca.

Con objeto de estudiar las tasas de movimiento, se ha estudiado la variación geomorfológica mediante tres fotogramas seriados de 1957, 1977 y 2000 de Prado Cerrado, presentadas a continuación para su análisis comparativo (Figs. 2.19 a). a c).



Fig. 2.18. Trazado de la red hidrográfica en la zona de estudio a escala 1:140.000.



Fig. 2.19. a). Captura en “cuello de buey” de un meandro del río Eresma al norte de la localidad de Coca. Fotografía del año 1957.



Figs. 2.19. b) y c). Captura en “cuello de buey” de un meandro del río Eresma al norte de la localidad de Coca. Fotografía del año 2000.

La formación de áreas endorreicas se aprecia principalmente en el sector septentrional de la zona de estudio. Los arroyos del Caño y de la Ermita presentan un cierto paralelismo con los cauces principales, drenando gran parte de la *Cubeta* hacia zonas semiendorreicas, donde se ha implantado un sistema de humedales, el Complejo de humedales de Coca-Olmedo, en áreas de baja pendiente y alimentadas por una red fluvial de carácter difuso.

En el sector meridional, el arroyo de la Ermita presenta un cierto paralelismo con el río Voltoya, si bien se encuentra adaptado a la configuración del terreno, bordeando la colina formada por el afloramiento de margas de la Formación Cuestas en el paraje denominado Cuerno de la Revilla.

La formación de áreas con drenaje deficiente probablemente responde a ligeros movimientos en la vertical, relativamente recientes, que impedirían el encajamiento y la salida de los distributarios al colector.

Se han detectado anomalías puntuales por **desplazamientos de los canales** en la margen derecha del río Eresma. En general, el trazado del cauce adquiere morfología menos energética, disminuyendo su índice de meandrificación, aumentando su linealidad hacia el NO y dejando llanuras de inundación de media luna hacia el noreste. Estos procesos de meandrificación, aparentemente exógenos, parecen tener un control estructural, al coincidir de nuevo con las directrices tectónicas deducidas por distintos procedimientos.

En los tributarios de segundo orden se detectan desplazamientos en el arroyo de la Ermita, con fuertes inflexiones, en general adaptadas a los afloramientos de las facies Cuestas en el sector meridional de la zona de estudio.

En la Fig. 2.20 se presenta la distribución de la red fluvial en la zona de estudio. En ella se aprecia que el curso de los cauces está fuertemente condicionado por los afloramientos margosos de las Facies Cuestas.

Las Figs. 2.21 a) a c) corresponden a zonas con un elevado índice de meandrificación, que podrían ser indicativas de actividad tectónica. Estas figuras corresponden a los ríos Voltoya, zona del Lavadero en los Prados del Amor (Fig. 2.21. a), meandro del Molino Nuevo de Coca (Fig. 2.21. b) y confluencia del río Voltoya con el arroyo Balisa en los manantiales del Batán y el Puente de Hierro (Fig. 2.21. c).

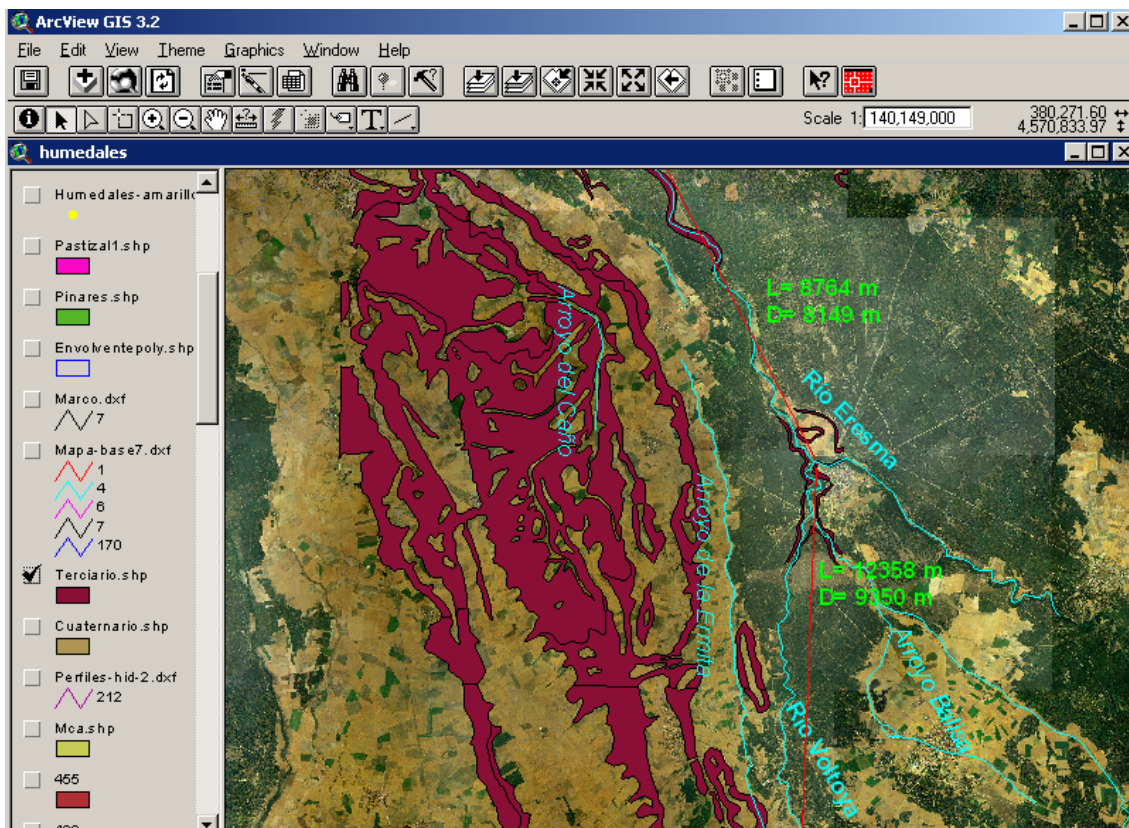
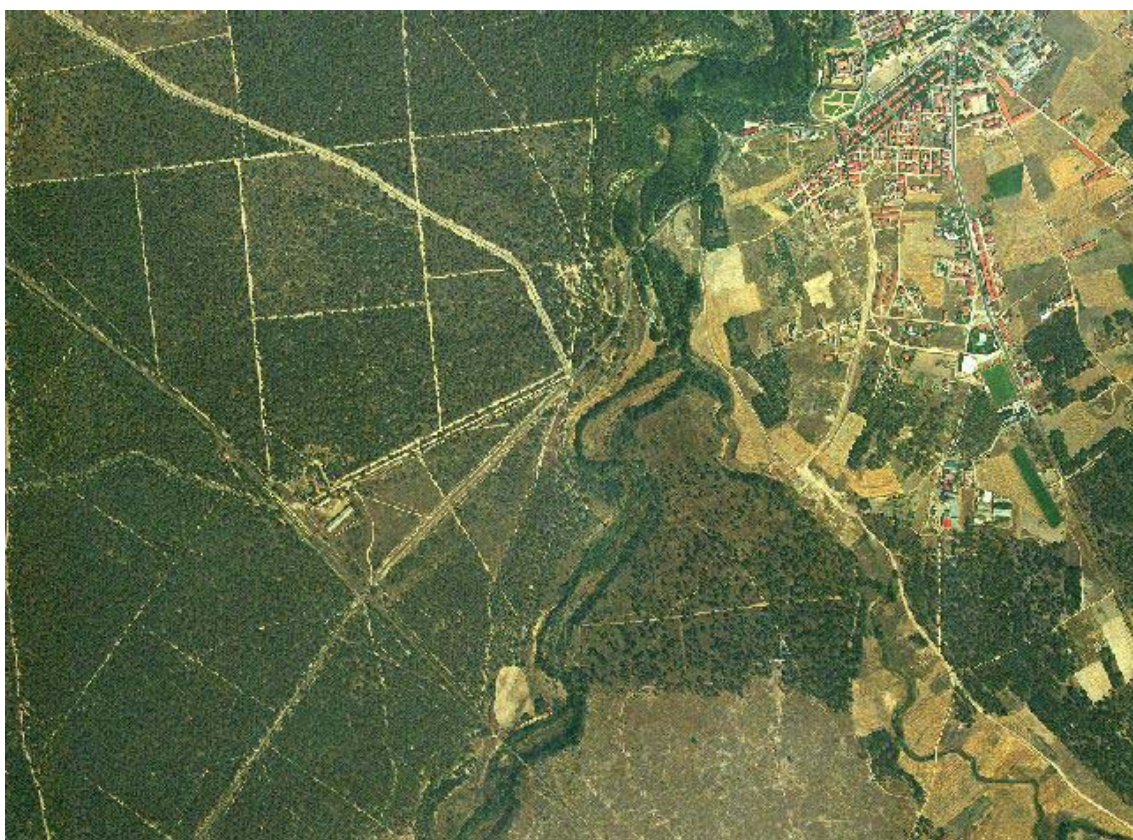


Fig. 2.20. Red hidrográfica y afloramientos de Facies Cuestas en la zona de estudio.



Fig. 2.21. a). Principales meandros en el río Voltoya indicativos de actividad tectónica.



Figs. 2.21. b) y c). Principales meandros en el río Voltoya indicativos de actividad tectónica.

- **Asimetrías en el número de terrazas (*Garrido-Mejías, 1982*)**

Las terrazas tienen su mejor representación en la margen oeste de los cauces fluviales del área de estudio, como depósito de los ríos Voltoya y Eresma. También se han identificado al menos dos niveles de terrazas asociadas al arroyo de la Ermita a su paso por la Dehesa Tetuán y la Cucaña.

El dispositivo morfológico de las terrazas medias y bajas es más o menos simétrico y se aproxima al de una zona con cierta estabilidad tectónica; así, las terrazas medias bajas (hasta 20 m) aparentemente presentan mayor amplitud que las restantes, y aparecen solapadas o encajadas. Las terrazas medias están con frecuencia colgadas, permitiendo que aflore el sustrato terciario (sectores central y septentrional de la zona de estudio). En las terrazas altas la distribución es claramente asimétrica, y los depósitos muestran ligeras deformaciones que indican que se desarrollaron en condiciones de inestabilidad tectónica.

La distribución de las terrazas en el arroyo de la Ermita es notablemente asimétrica, según se ha podido constatar en la excavación realizada para la construcción del cauce de recarga artificial, coincidente en un 30% con el cauce del arroyo de la Ermita, discurriendo muy cercano el resto del trazado (*MAPA, 1999c*). Este cauce ha desarrollado sus terrazas generalmente en su orilla derecha, coincidiendo con el basculamiento hacia el noreste de este sector de la *Cubeta*.

Los depósitos de llanura de inundación y fondos de valle son muy frecuentes en el sector oriental del área de estudio. Sus características se han expuesto en el Apto. de sedimentología.

La asimetría de sus valles es patente, lo que ha conducido a la formación de terrazas en las márgenes izquierdas de los ríos, con mucho mayor grado de desarrollo que en las derechas, según se aprecia en los perfiles y en la cartografía geológica.

5.5. GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

Para profundizar en el conocimiento tridimensional del acuífero superficial se han empleado datos directos e indirectos.

Entre los **datos directos** destaca la obtención de 37 columnas litológicas de sondeos en la zona de estudio, 26 de ellos perforados por el MAPA, entre 1999 y 2003, mientras que los 11 restantes corresponden a captaciones de particulares, datos de la CHD o empresas de perforación. Los datos obtenidos se presentan en el Anexo 2.2.

Con objeto de contar con más datos que permitan reconstruir el contacto entre las facies terciarias y cuaternarias, se han digitalizado y georreferenciado contactos en campo, a partir de afloramientos en las terrazas de los ríos Voltoya y Eresma, en el trazado del caz de recarga artificial en la zona del Pinar de Ciruelos, así como en contactos terciario-cuaternario de borde de la *Cubeta*.

Los contactos han sido digitalizados en la cartografía geológica georreferenciada, comprobando su posición sobre la ortoimagen digital a escala 1:15.000. Los afloramientos han sido posicionados con GPS monofrecuencia.

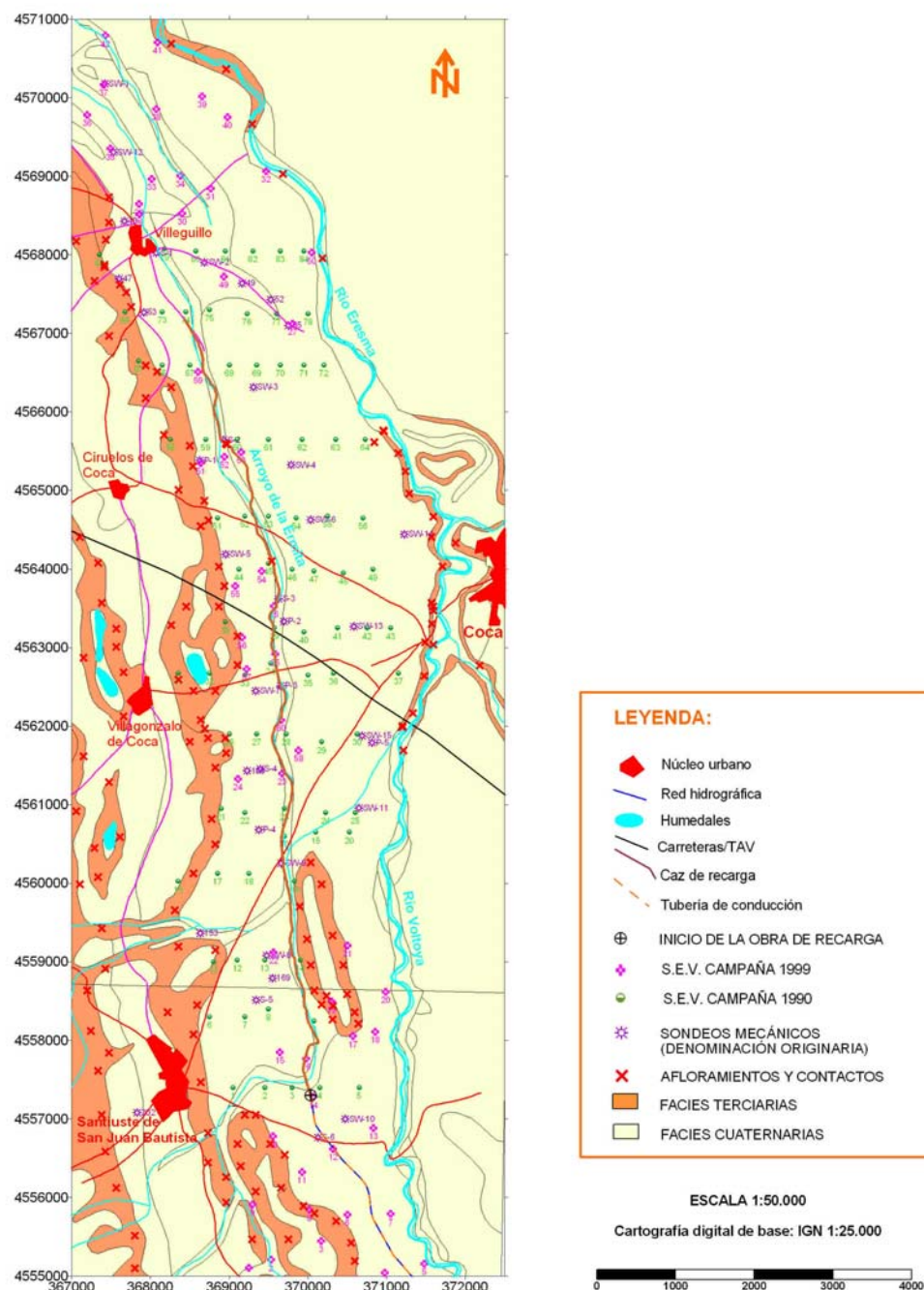
Se han obteniendo un total de 141 puntos, 120 digitalizados y 21 cartografiados en campo, que se han añadido al listado anterior.

Entre los **datos indirectos** se destaca el resultado de dos campañas de prospección geofísica promovidas por el MAPA. Una primera campaña de aproximación fue realizada en 1990, y constó de 87 sondeos eléctricos verticales (SEV) distribuidos en el área de estudio. La segunda campaña fue realizada en 1999, para profundizar en el conocimiento, con otros 60 SEV (ver Anexo 2.2).

Para el empleo de los datos indirectos se ha llevado a cabo la reinterpretación de los resultados obtenidos en la campaña de prospección geofísica, unificando además los criterios interpretativos. Como resultado se han desechado aquellas curvas de campo de comportamiento anómalo o irrelevante (SEVs ns.º 13, 22, 25, 30, 39, 59, 80, 86 y 87 de la campaña de 1990, y los SEVs ns.º 4 y 37 de la de 1999) (*IRYDA, 1990 y MAPA, 1999a*).

La posición de los puntos con disponibilidad de datos, bien directos o indirectos, se presentan en la cartografía 2.22.

Fig. 2.22. Cartografía con la posición de los puntos de columna litológica conocida por métodos directos o indirectos (elaboración propia con datos del MAPA, 1999a y 2003) (página siguiente).



CARTOGRAFÍA CON LA POSICIÓN DE LOS PUNTOS DE COLUMNA LITOLÓGICA CONOCIDA



Con la totalidad de los datos obtenidos (314) se ha elaborado una tabla, en la que son diferenciadas tres facies principales en base a su comportamiento hidrogeológico: arenas eólicas superficiales, gravillas y arcillas cuaternarias de origen aluvial, contacto difuso en muchas zonas donde aparecen entremezcladas con los materiales alterados más superficiales de las Facies Cuestas del Terciario, y, por último, las Facies Cuestas propiamente dichas. Esta tabla se presenta en el Anexo 2.2, con constancia de la cota de los contactos y el espesor de las formaciones.

Con la totalidad de los datos han sido elaboradas unas mallas o *grids* que, además de presentar la reconstrucción tridimensional del acuífero cuaternario y la geometría del techo de las Facies Cuestas con claridad, han servido como base para las simulaciones cuantitativas (conceptualización del acuífero), cualitativas y para la deducción del funcionamiento hidrogeológico del sistema.

Estas capas suponen una ampliación de las mallas generadas por el MAPA (*en MAPA, 1999a*), que de techo a muro son: superficie topográfica, muro del acuífero eólico cuaternario y muro del acuífero eólico y aluvial (coincidente con el techo del acuitardo terciario). A estas mallas hay que añadir las generadas para la superficie piezométrica en las distintas fechas de medición de las redes de control. Estas *grids* han sido empleadas en las operaciones de álgebra de mapas (cubicar el volumen del acuífero, etc.).

El Modelo Digital del Terreno empleado para la reconstrucción de la superficie topográfica ha sido a escala 1:15.000 con un metro de precisión (*JCL, 2000*).

Las dos últimas mallas suponen una reconstrucción paleogeográfica de los distintos elementos (paleoambientes sedimentarios) empleados en las operaciones de álgebra de mapas (cubicar el volumen del acuífero, etc.). Estas operaciones han consistido en la sustracción a la superficie topográfica de las mallas generadas con los espesores de los dos acuíferos diferenciados, procedimiento que presenta mejores resultados que la interpolación directa con datos de cota en metros sobre el nivel del mar.

La densidad de información resultante para la zona de *Cubeta* propiamente dicha (42,19 km²) es de **7,44 puntos por km²**.

Con los resultados de las operaciones de álgebra de mapas, se han reconstruido sendos bloques diagrama y mapas en perspectiva, que permiten visualizar la geometría del acuífero. Estas figuras corresponden a la reconstrucción de la superficie topográfica actual (Fig. 2.23), la del muro del acuífero cuaternario eólico (Fig. 2.24), y la de la reconstrucción paleogeográfica del techo del acuitardo terciario, o muro del acuífero eólico y fluvial cuaternario (Fig. 2.25).

Observando minuciosamente los bloques diagrama, cuyo examen conjunto puede realizarse en la Fig. 2.26, cabe destacar ciertos aspectos de la geometría del acuífero que guardan una estrecha relación con todos los aspectos del medio físico, como son el comportamiento hidrogeológico y químico del sistema, su conexión con el acuífero regional, con los humedales existentes y con las redes de drenaje o descarga (ríos Voltoya y Eresma).

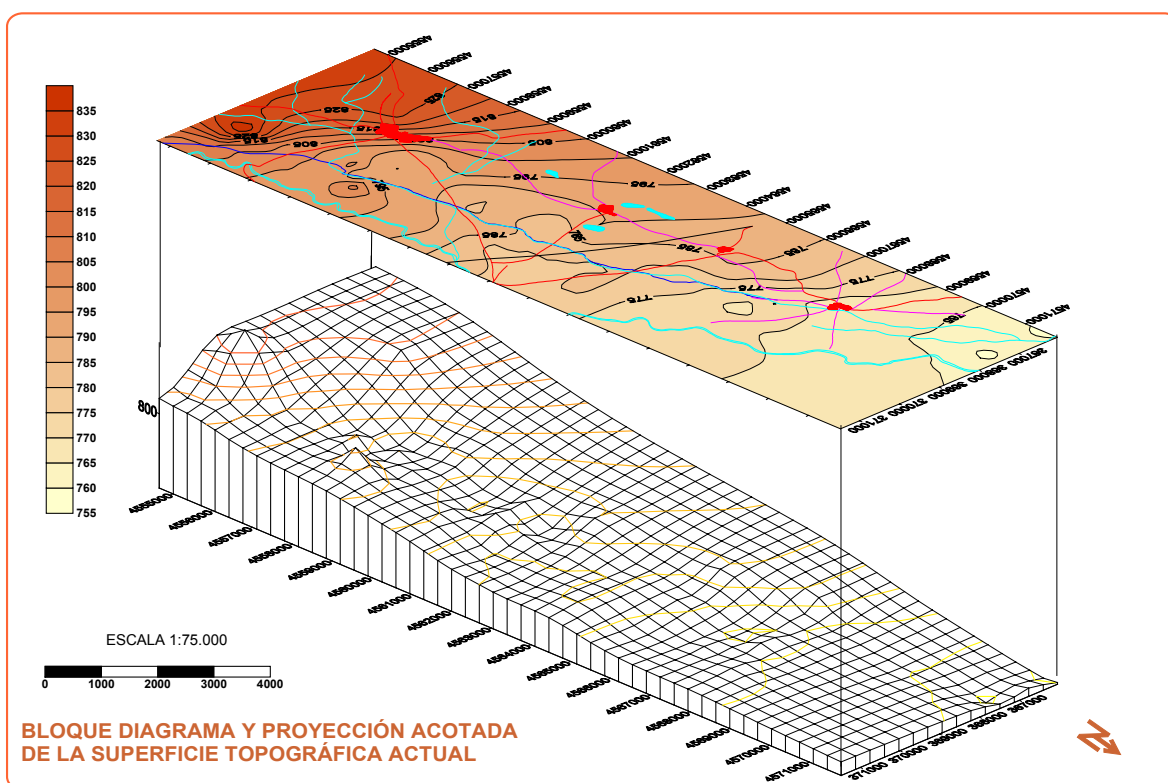


Fig. 2.23. Bloque diagrama proyectado en un plano con la reconstrucción tridimensional de la superficie topográfica actual.

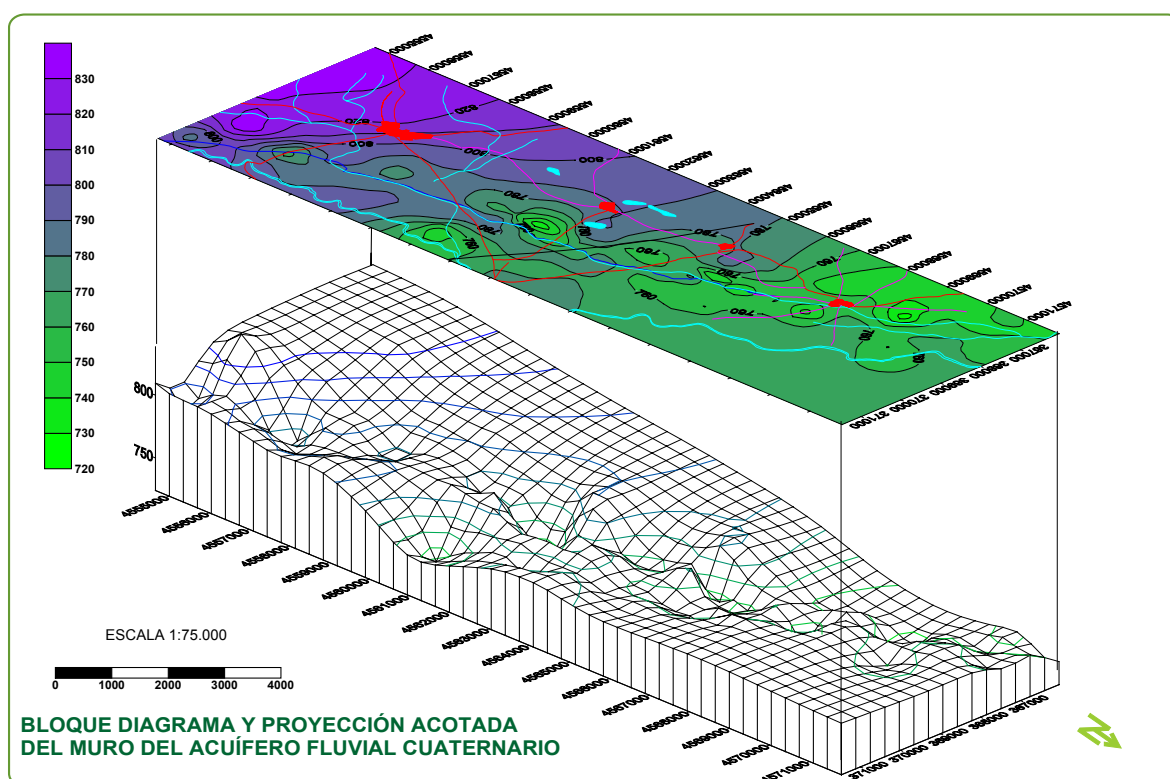


Fig. 2.24. Bloque diagrama proyectado en un plano con la reconstrucción tridimensional del muro del acuífero eólico cuaternario (modificado de Galán et al, 2001)

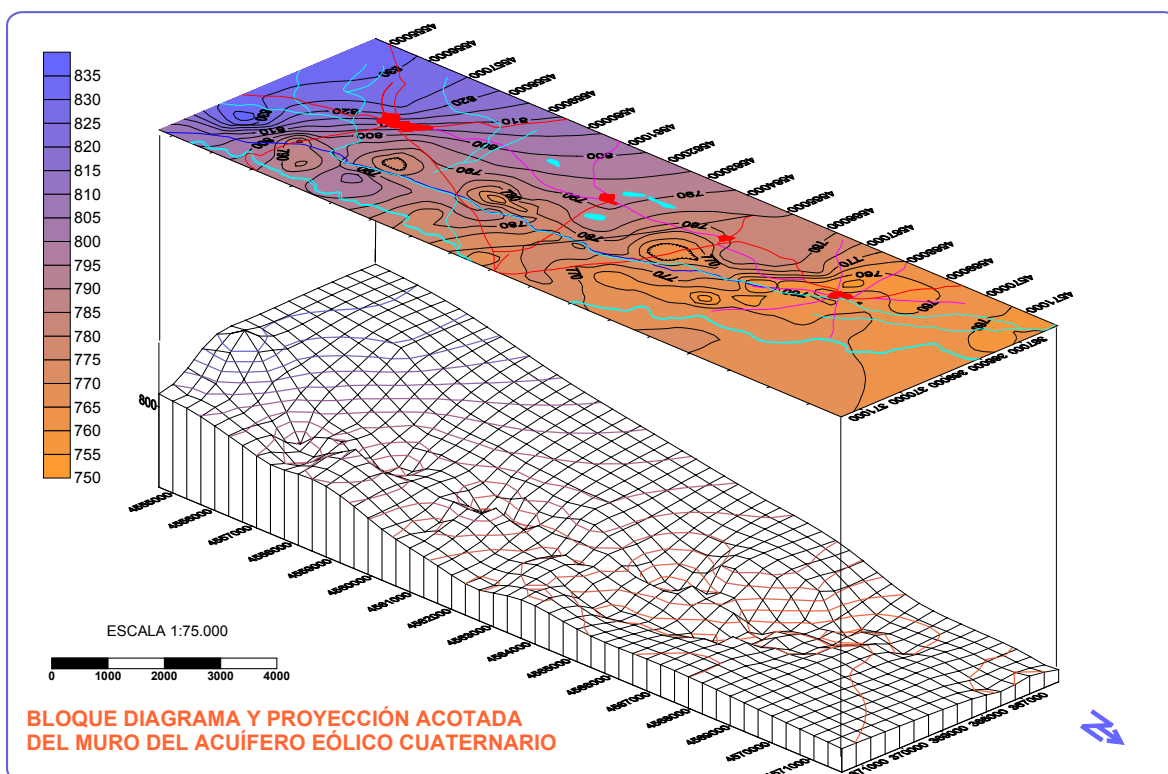


Fig. 2.25. Bloque diagrama proyectado en un plano con la reconstrucción tridimensional del muro del acuífero mixto eólico-fluvial-lagunar cuaternario o techo del acuitardo terciario (modificado de MAPA, 1999a).

Desde un punto de vista *hidrogeomorfológico* (Salama et al, 1997), a grandes rasgos, cabe fraccionar el acuífero superficial en dos grandes unidades longitudinales. Quedan divididas por un afloramiento de materiales terciarios, localizado al noreste del casco urbano de Santiuste, en un montículo elongado con el eje principal en dirección norte-sur (umbral alargado en la parte inferior derecha de la Fig. 2.23 y de los bloques diagrama 2.24 a 2.26).

Estas cubetas o ramales (según la terminología empleada en IRYDA, 1990), correspondientes a los sectores o acuíferos este y oeste (según la terminología empleada en esta tesis) representan unos *paleovalles* de orientación subparalela según la dirección SSE-NNO, en ambos casos, y se acuñan en ambos extremos.

Algunos de los principales rasgos detectados involucrados en el funcionamiento hidrogeológico del sistema actual son:

El sector *oeste* de la *Cubeta* podría corresponder a un paleocauce en el que se suceden cuatro cubetas de mayor profundidad, en una estructura de drenaje superficial vertiente hacia el norte y alineadas con un eje de dirección NNO-SSE.

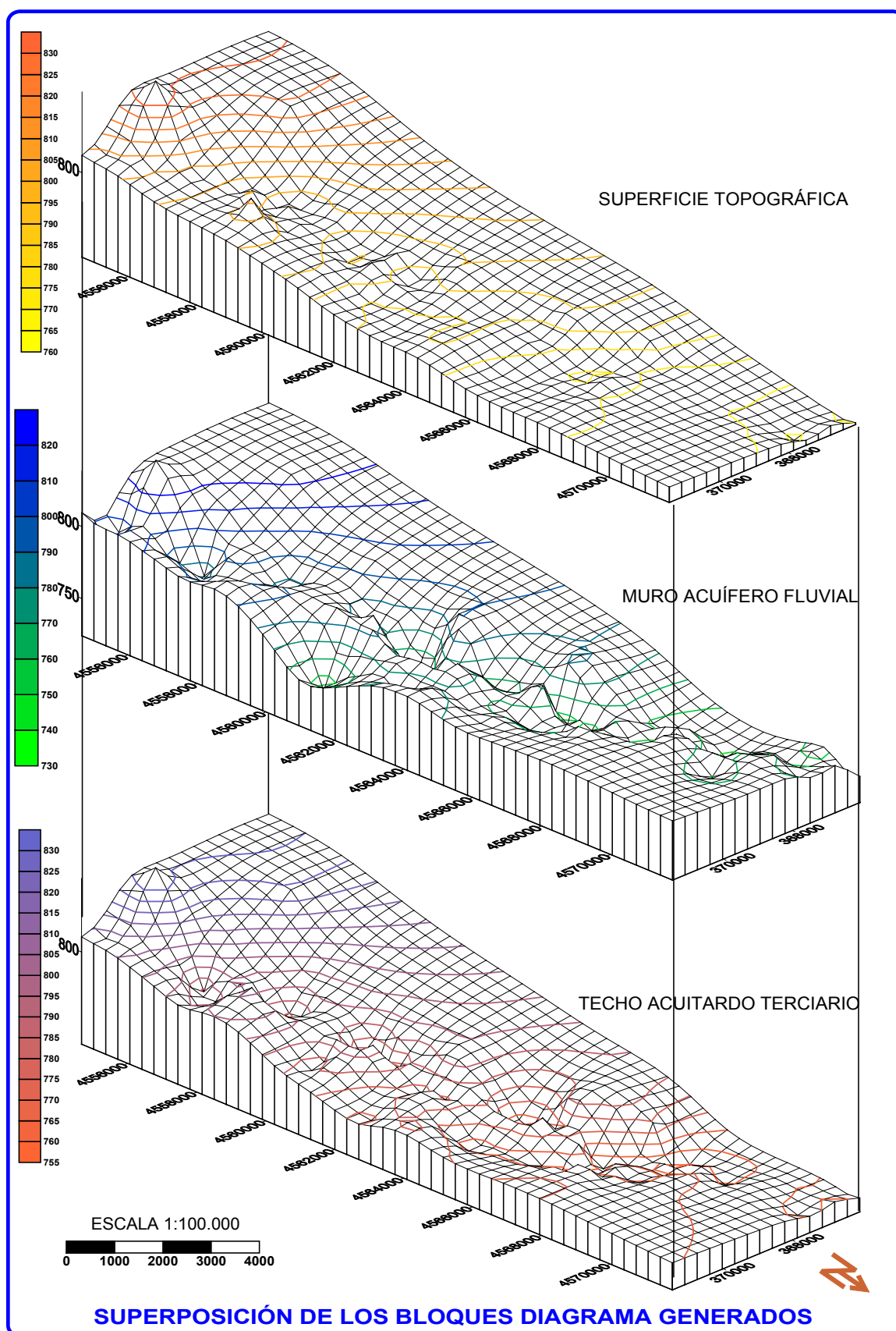


Fig. 2.26. Superposición de tres bloques diagrama correspondientes a la superficie topográfica, muro del acuífero eólico cuaternario y muro del acuífero eólico y fluvial cuaternario (o techo del acuitardo terciario).

Estas cubetas paleogeomorfológicas (paleoambientes sedimentarios) están ubicadas, de sur a norte, al este de Villagonzalo de Coca (en las inmediaciones de la laguna de la Iglesia, por el sureste), en el centro del triángulo entre Coca, Ciruelos y Villagonzalo, al E-NE de Villagonzalo de Coca y al sureste de Villeguillo. Hay cubetas de menor entidad diseminadas por la zona de estudio.

En el bloque diagrama de la Fig. 2.27 se aprecia claramente la diferenciación de dos ramales. El ramal derecho aparentemente contaba con cauce fluvial encajado, drenaba desde la divisoria de aguas hacia el este, confluyendo con el río Voltoya a través de un paleocauce coincidente a grandes rasgos con la actual cacera de Betaya.

El ramal izquierdo presentaba una configuración parecida a los afloramientos terciarios del oeste de la *Cubeta* en la actualidad, con presencia de áreas endorreicas desarrolladas e implantación de sistemas lagunares, en concordancia con el Complejo de humedales de Coca-Olmedo presente en la actualidad e implantados en el sistema desde antes del Cuaternario (*Rey Benayas, 1991*).

Además de existir “cubetas” desconectadas en áreas endorreicas, parece haber un sistema de drenaje semiparalelo al actual arroyo de la Ermita, que drena el ramal derecho hacia el sector norte de la *Cubeta*, donde, por motivos topográficos, consolidaba un sistema de humedales.

Como ya se ha explicado, la disposición de estas cubetas coinciden de forma aproximada con el trazado del arroyo de la Ermita, de orientación NNO-SSE, principal eje de drenaje de la *Cubeta* aparentemente desde el período Terciario, lo que induce pensar en que este trazado se ajusta a la tectónica del basamento. Este trazado ha sido el empleado como eje principal del dispositivo de recarga artificial diseñado y ejecutado por el MAPA (*MAPA, 1999a y c*).

Este sector o ramal es el que ha dado origen al acuífero superficial más intensamente explotado en la zona. Su sección es más o menos simétrica en su mitad sur, mientras que en el extremo norte (inmediaciones de Villeguillo), presenta una pendiente más abrupta en la margen oriental que en la occidental.

En este sector o ramal se han testificado espesores de sedimentos cuaternarios de hasta 45 metros por sondeos perforados en la cubeta situada más al noroeste.

El *sector este*, acuífero formado sobre la otra paleoforma rellena de arenas eólicas de la Fm. Arévalo, se encuentra poco explotado. Presenta una longitud de 11,5 km y una anchura media de unos 700 m. Su profundidad máxima es algo inferior que la del acuífero O, oscilando entre 15 y 25 m. En su trazado es atravesada por los cauces de los ríos Voltoya y Eresma de forma oblicua, que drenan el acuífero al tener un comportamiento ganador en este tramo. Hay además drenes que alimentan los manantiales existentes en las terrazas de la margen izquierda de estos cauces, destacando la cacera de Betaya, aliviadero que parte del arroyo de la Ermita, en el puente de Betaya, a través del pinar del Sanchón, y desemboca junto al puente del tren de alta velocidad y del antiguo Molino del Batán, donde se han detectado varios rezumes y manantiales en el inventario de puntos de agua.

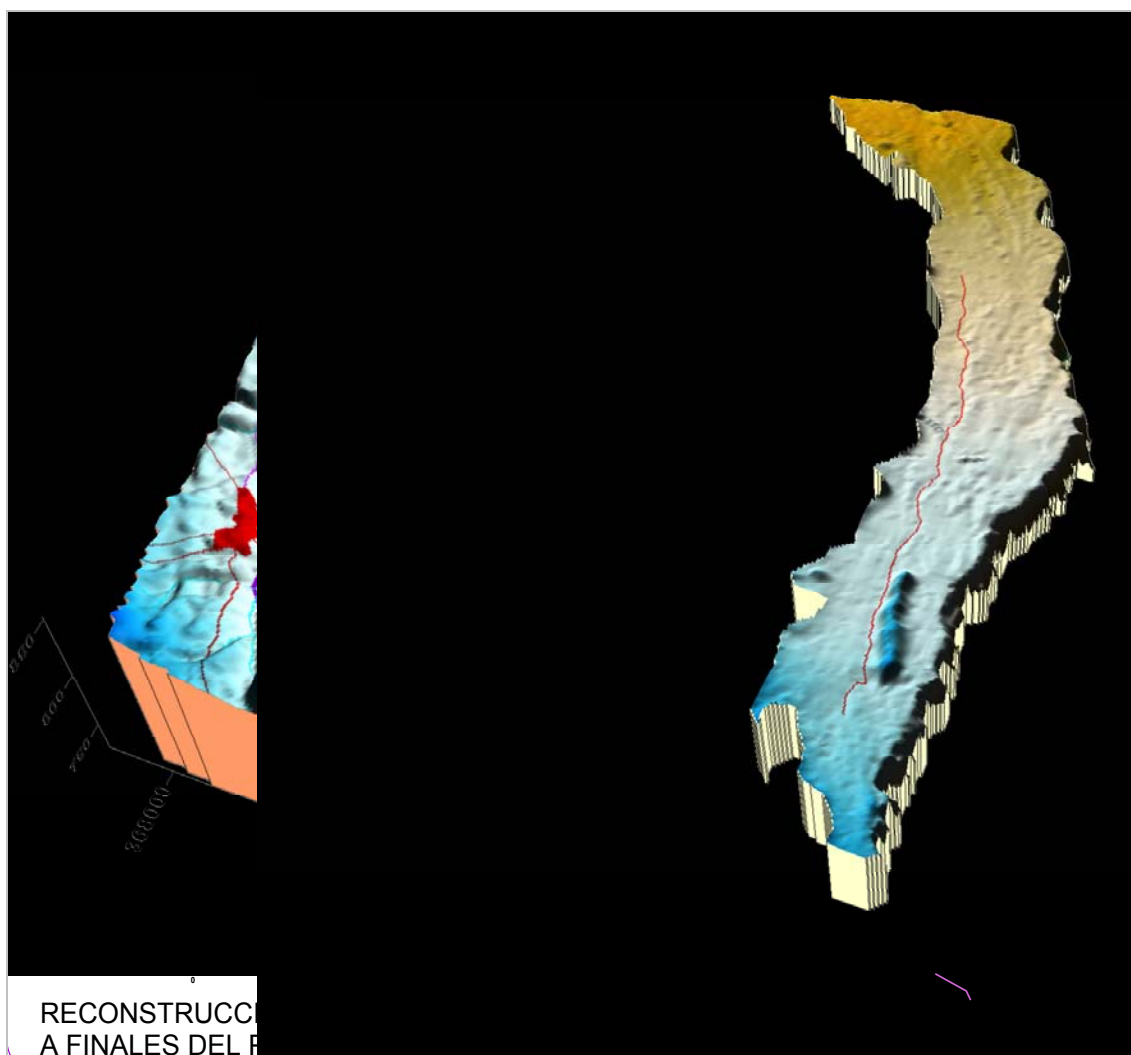


Fig. 2.27. Relieve terciario. Perspectiva en 2 1/2 D de la zona de estudio, con la ubicación de los núcleos urbanos y cauces principales, así como del umbral que separa ambas zonas de la Cubeta.

Su sección es más o menos simétrica en su mitad norte, mientras que la sur presenta un margen occidental de pendiente más abrupta que la oriental, especialmente en las inmediaciones del cauce del río Voltoya, donde ha sido intensamente erosionada por él.

En el sector central de la cubeta aparece un umbral de separación de ambos sectores, correspondiente a una zona de ascenso por motivos tectónicos. Se trataría de algo asimilable a un anticlinorio cuyo eje presenta una orientación NE-SO.

Con los datos de espesores del acuífero cuaternario principal se ha elaborado un mapa de isopacas a escala 1:40.000 (Fig. 2.28), donde se aprecia la distribución de las principales cubetas y el espesor del acuífero en cada una de ellas. En color gris se han representado aquellas zonas con presencia de una pátina de arena eólica superficial, en general de espesor inferior al metro.

Como elementos adicionales, se han representado todos los puntos de control, sondeos mecánicos, sondeos eléctricos verticales, contactos cartografiados en campo o digitalizados, sobre la cartografía de base del IGN a escala 1:25.000.

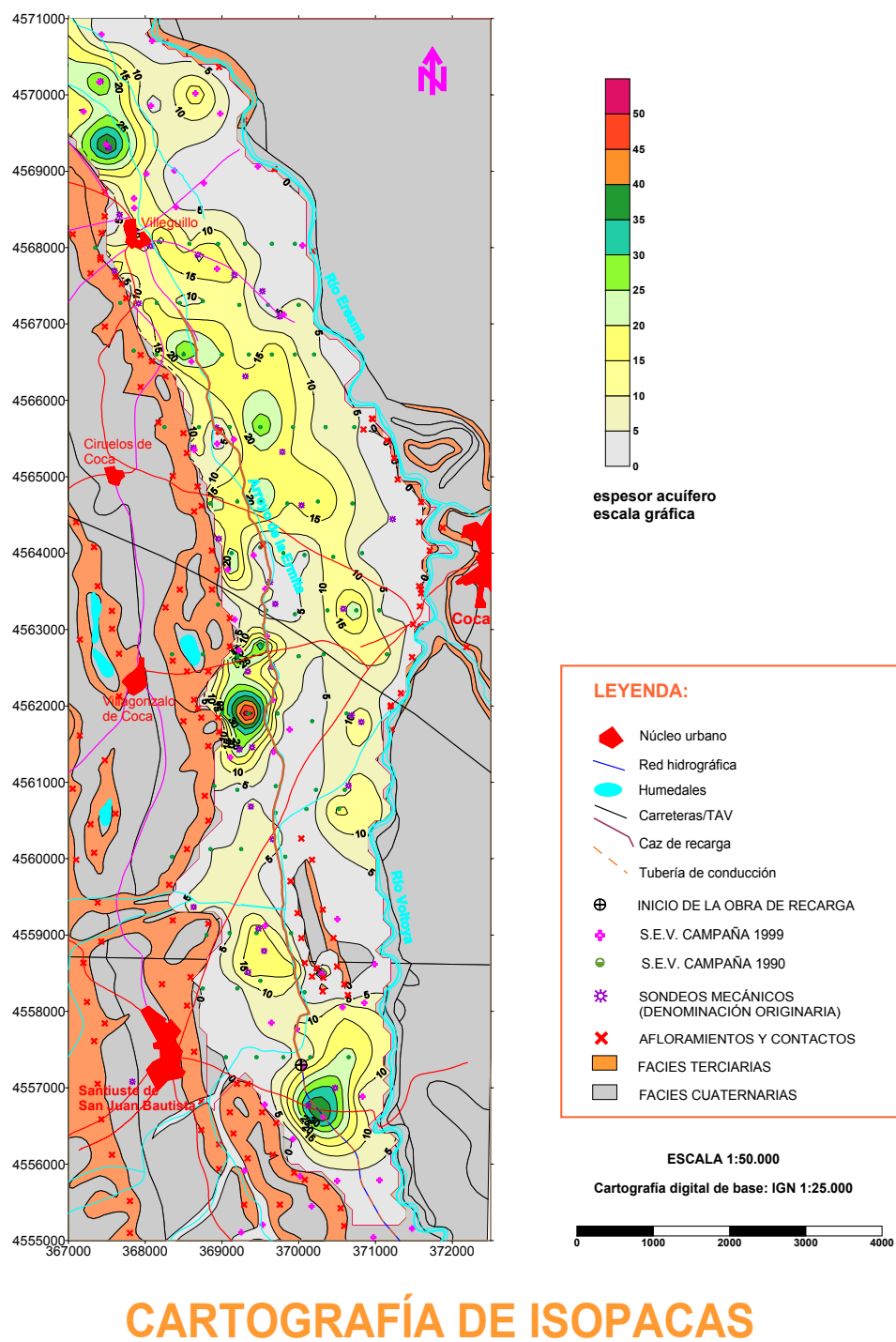


Fig. 2.28. Cartografía de isopacas. La disposición de las cubetas y máximos espesores de arena quedan distribuidos, en general, de acuerdo con la orientación tectónica NNO-SSE.



Con objeto de precisar más en esta orientación se ha digitalizado el punto de espesor máximo de sedimentos de las nueve cubetas “en relevo”, y representado en un diagrama de dispersión. Sobre este diagrama se ha interpolado una curva de regresión (Fig. 2.29) y deducido la ecuación de la recta dando a los ejes la misma escala.

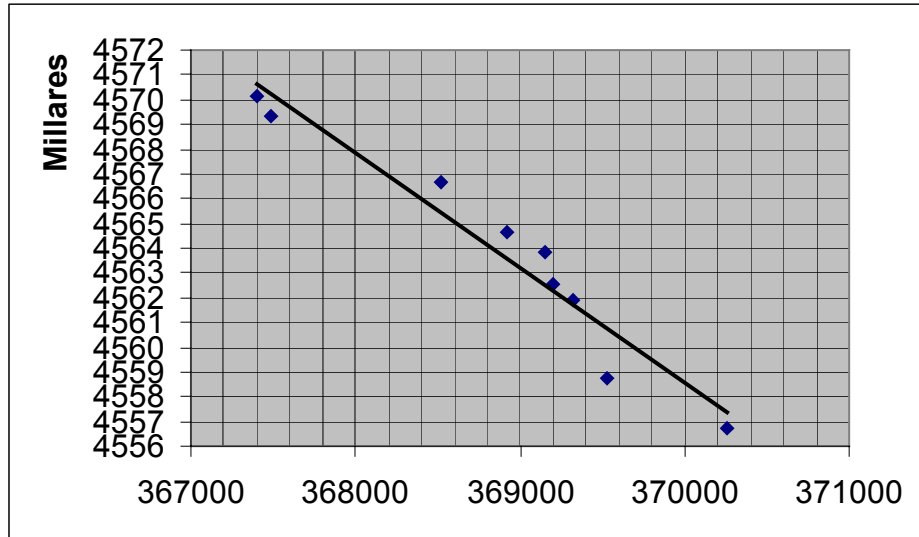


Fig. 2.29. Posición georreferenciada de los puntos de espesor máximo de arenas deducidos con la información disponible (técnicas directas e indirectas) y recta de regresión. Los ejes, correspondientes a coordenadas UTM se presentan a distinta escala.

La ecuación de la recta de regresión o serie de tendencia deducida es, en coordenadas UTM:

$$Y = -4.6544x + 6280679 \text{ con un factor: } R^2 = 0,9374$$

De acuerdo con esta metodología, se deduce que las cubetas están orientadas de acuerdo con una dirección N12O, es decir, NNO-SSE.

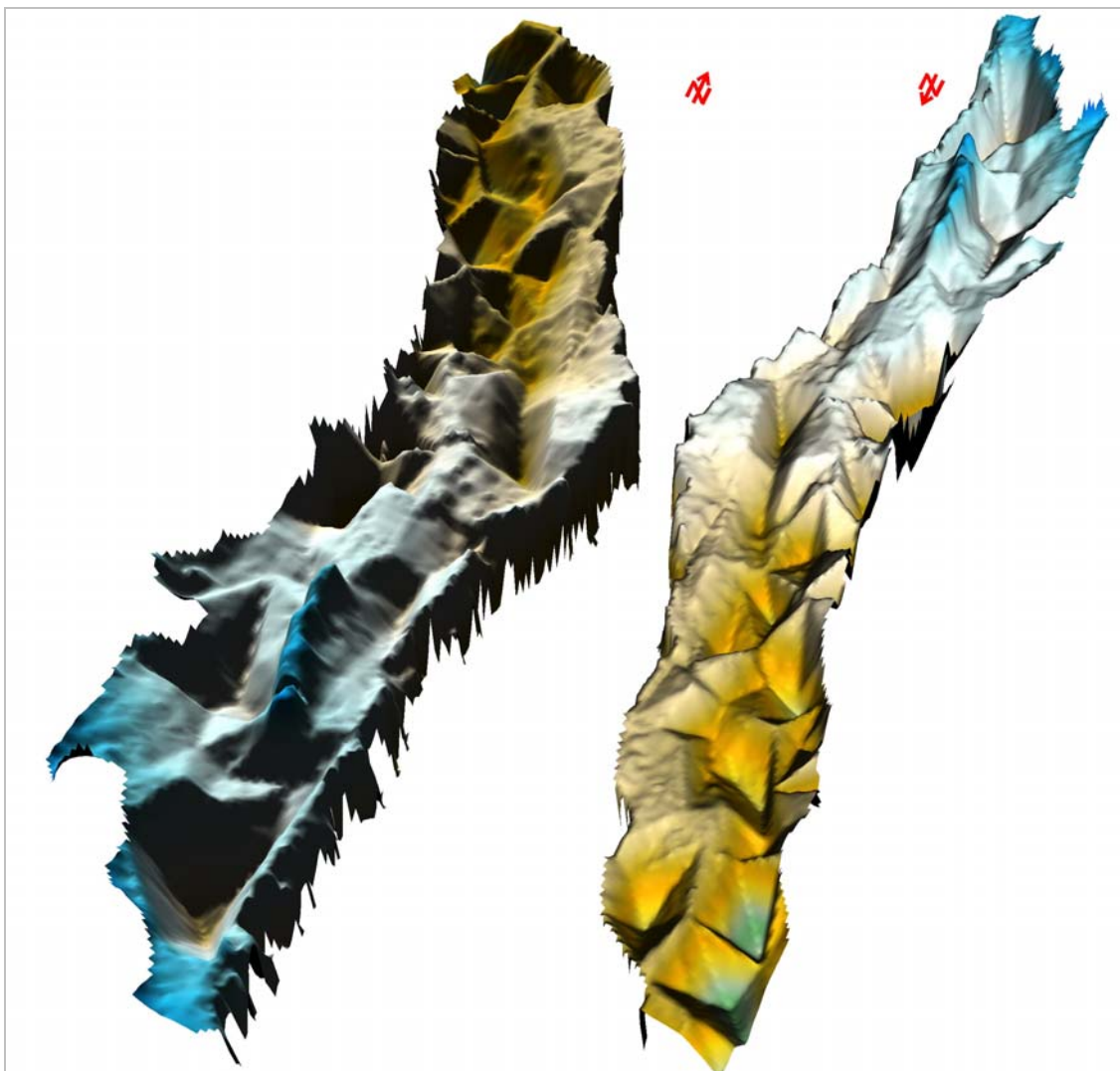


Fig. 2.30. Bloque diagrama donde consta la reconstrucción tridimensional de la Cubeta desde dos perspectivas diferentes antes de depositarse las arenas eólicas.

5.6. CONCLUSIONES DEL APARTADO GEOLOGÍA

Se han detectado estructuras sedimentarias en el sistema dunar que, aunque sean puntuales, han permitido diferenciar un sistema de progradación desde el suroeste hacia el noreste, orientación similar a las actuales líneas de flujo de las aguas subterráneas.

Las técnicas empleadas indican la existencia de una actividad tectónica actual muy moderada en el área de estudio, si bien, el trazado de sus principales cauces fluviales y otros elementos geomorfológicos estuvieron condicionados directamente por esta actividad en el pasado.

A finales del período Terciario de produjo un basculamiento de la cuenca hacia el oeste (fase Rodánica o Iberomanchega), dando origen a amplios pliegues, a los que se asocian procesos erosivos “costras clásticas rojas” (*Pérez González, 1979*) recubriendo las depresiones. Esta cubierta condicionó la instalación de la red fluvial cuaternaria.

La zona de estudio no parece ajustarse a este modelo conceptual, induciendo a pensar en la existencia de unos bloques individualizados en el sustrato, de comportamiento insolidario con el regional. Existen indicios en la zona que conducen a pensar en la fuerte influencia de la actividad tectónica, tales como el profundo encajamiento y la progresiva disminución de las llanuras de inundación de los ríos Eresma y Voltoya, la asimetría de los valles, el basculamiento hacia el noreste del sustrato en el sector central y hacia el noroeste en el septentrional y la formación de terrazas en las márgenes izquierdas de los cauces.

Se han empleado varias técnicas para el estudio de la influencia de la tectónica en la zona de estudio, e indirectamente en su comportamiento hidrogeológico. Cabe destacar la teledetección (escala regional), la fotointerpretación (escala intermedia y local), el estudio de modelos digitales del terreno actuales y del paleorrelieve, estudios de neotectónica, sedimentología y anomalías geomorfológicas.

La atribución de lineamientos al relieve actual a distintas escalas ha permitido deducir tres orientaciones tectónicas preferentes: la NO-SE, la ENE-OSO y la NE-SO. La toma de datos en 11 estaciones mesoestructurales, generalmente venas de recristalización, constatan que las principales direcciones de fracturación son: NNO-SSE, NO-SE, NNE-SSO y NE-SO (N40E), coincidente con una de las orientaciones principales de fracturación tardihercínica en la Cuenca del Duero. Se ha deducido una dirección de compresión N133E y otra de esfuerzos distensivos N43E. Aparentemente, la sedimentación en el área de estudio está controlada por el comportamiento tectónico de un accidente profundo, delimitado por fracturas NE-SO. Este hecho podría corresponder al basculamiento hacia el NE en el sector meridional, insolidario con el basculamiento de la Cuenca del Duero (al oeste), mientras que el del sector septentrional lo haría al noreste, creando áreas endorreicas sin drenar por el río Eresma.

Si el basculamiento del bloque del basamento ha controlado la sedimentación en el área de estudio, los depósitos de sedimentos más recientes, especialmente los fluviales, tendrán una orientación solidaria. La observación de un mapa litológico de la zona de estudio permite apreciar que las formaciones cuaternarias más jóvenes aparecen alineadas con las orientaciones NE-SO, ENE-OSO y NNO-SSE. Este hecho podría ser explicado por el basculamiento hacia el noreste de uno o varios bloques del basamento

crystalino de escala superior a la de la *Cubeta*, acompañado de un movimiento compresivo ortogonal (N133E) con flexura, mientras que la vergencia general de la cuenca es hacia el oeste. En consecuencia se aprecian dos zonas con distintos estilos de deformación, directrices tectónicas y polaridad sedimentaria

El río Voltoya discurre en dirección prácticamente norte-sur hasta el pinar del Sanchón, donde presenta una inflexión hacia el este, adquiriendo una nueva orientación SSO-NNE (N13E). Los segmentos de sus meandros de orientación NE-SO son más rectilíneos que los restantes, lo que induce a pensar en una dirección de basculamiento hacia el noreste. El río Eresma presenta una orientación NNO-SSE (N26O), acorde con los principales lineamientos de la zona de estudio. Los meandros presentan tramos más rectilíneos en la orientación NO-SE.

Los principales criterios geomorfológicos que indican actividad tectónica se basan en el estudio de la red de drenaje, aplicación de índices específicos para determinar la presencia de actividad tectónica y la detección de anomalías geomorfológicas. Se han aplicado tres índices geomorfológicos sensibles a movimientos tectónicos verticales recientes, el índice del gradiente del Talveg, el índice de sinuosidad de escarpes y el de relación anchura del fondo de valle/altura del valle.

En cuanto a la génesis de los tres sistemas de terrazas diferenciados y de sus llanuras de inundación indican un cambio en el estilo fluvial. Las terrazas medias indican una sedimentación en sistemas de baja sinuosidad (conglomerados con desarrollo de barras transversales, estratificaciones cruzadas en surco, etc.); sin embargo, las bajas y altas debieron ser generadas por sistemas de alta sinuosidad muy similares a los cursos actuales.

En cuanto a la tectónica reciente, las terrazas fluviales altas tienen una distribución asimétrica, y los depósitos muestran indicios de deformaciones que indican que se desarrollaron en condiciones de cierta inestabilidad tectónica, hipótesis avalada por los índices geomorfológicos y los indicadores de actividad tectónica calculados. Según éstos, el sector central presenta indicadores de basculamiento hacia el NE, con discontinuidades en dirección NNE-SSO asociadas al río Voltoya. Se han detectado además indicadores de actividad compresiva de orientación N140E y una distensiva ortogonal (N50E), lo que nos lleva a pensar en la presencia de accidentes profundos que han podido generar reajustes y pequeños juegos tectónicos.

En síntesis, la geometría de la *Cubeta* es compleja, debido a que la Unidad Arévalo rellena cubetas del paleorrelieve a finales del terciario. La “paleoforma” oriental corresponde a un paleocauce hasta el sector central, donde pasa a una zona con presencia de frecuentes áreas endorreicas y depósitos de llanura de inundación. La occidental presentaba una serie de “cubetas” a finales del terciario que estaban alineadas por un cauce fluvial. Se trataba de un sistema mixto fluvial y lagunar donde se implantó un sistema dunar. A partir del sector central el sistema pierde nitidez en cuanto a la conexión de las cubetas se refiere, y parece funcionar como un “sistema de cubetas en cascada”, de modo que hacia el norte presentan un nivel de llenado topográficamente más bajo y el llenado de cada depresión llenaría la siguiente por desbordamiento.

Con esta hipótesis se ha simulado un “modelo analógico” para diferentes “niveles de llenado” de las cubetas del paleorrelieve, modelo que se presenta en el Apto. 10.5.

6. CLIMA

Se ha realizado un estudio de los datos climáticos como etapa previa a la determinación de los recursos hídricos en la zona de estudio.

La metodología empleada tiene carácter secuencial, y consta de varias fases:

6.1. REVISIÓN DE LA RED METEOROLÓGICA

Se ha revisado la red meteorológica nacional, con objeto de conocer qué estaciones están comprendidas en la zona de estudio y cuentan con un registro histórico suficientemente largo. De las ocho disponibles se ha seleccionado la estación 2502, Santiuste de San Juan Bautista, por considerarse la más adecuada al ser “termo-pluvio”, estar bien ubicada para los fines del estudio y presentar una serie de datos más larga y completa que las restantes. Se han adquirido los datos registrados del Instituto Nacional de Meteorología.

6.2. ESTUDIO DE LAS SERIES DE DATOS

La estación 2502, además de ser la más cercana a los dispositivos de recarga artificial, tiene una serie de datos suficientemente larga (con medidas termo y pluvio desde 1987 hasta la actualidad). Esta serie ha sido analizada buscando los “huecos” o carencia de medidas en las observaciones, que han sido completados, corregidos y restituidos por el método de las “dobles acumulaciones”.

En el Anexo 2.4.1 se adjuntan los datos climáticos de la estación 2502, Santiuste de San Juan Bautista. Con estos datos restituidos se han elaborado histogramas de las temperaturas y precipitaciones medias mensuales en el período 1987-2002 (Figs. 2.31 a-b).

6.3. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS POR EL MÉTODO DE THORNTHWAITE

A partir de estos datos se ha calculado el excedente hídrico en el suelo, resultado de la expresión:

$$(P_0 - ET_0)$$

Donde:

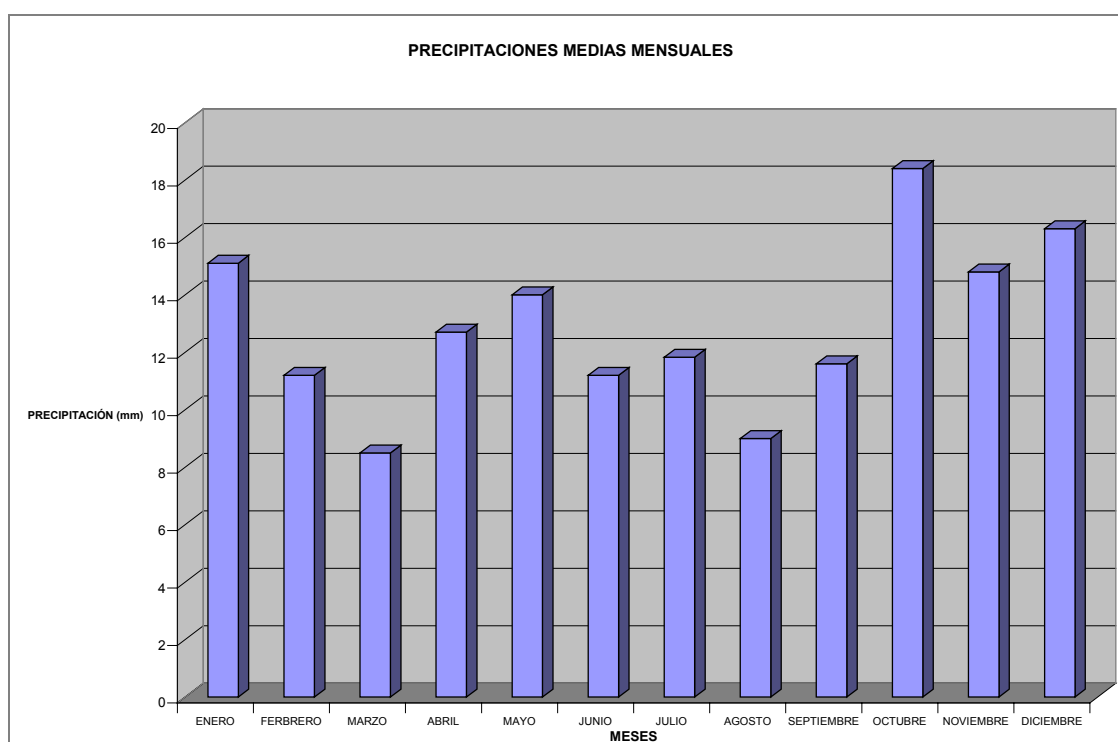
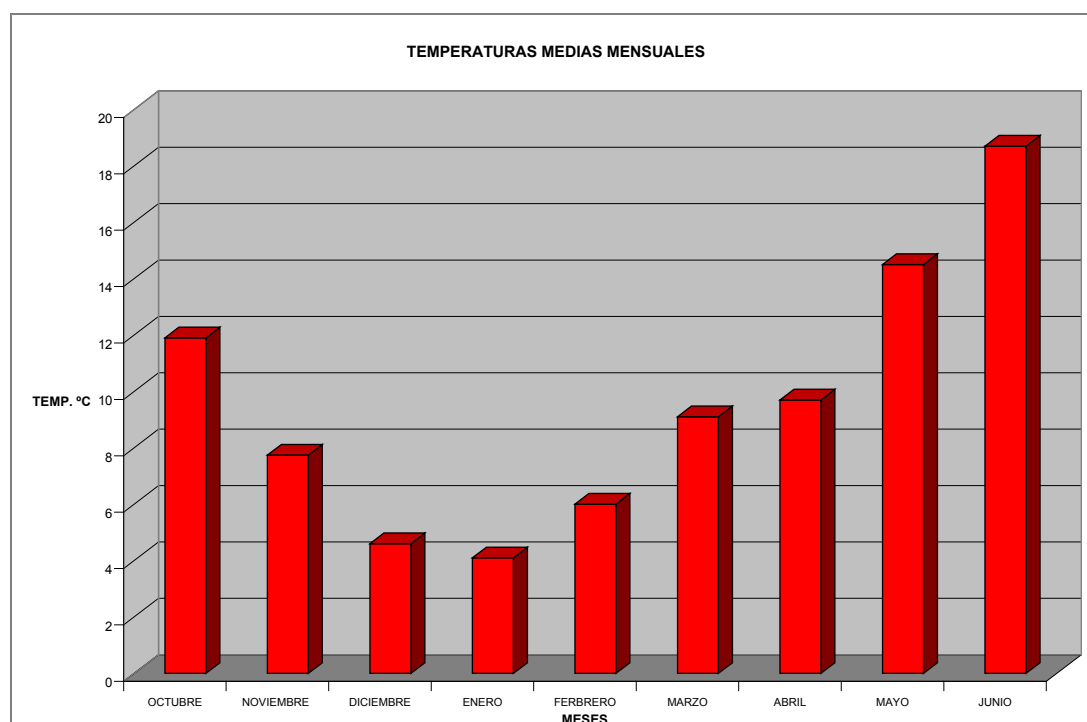
- P_0 : Precipitación Efectiva.
- ET_0 : Evapotranspiración Potencial de Referencia.

Esta expresión ha sido resuelta aplicando el método de Thornthwaite, considerada una metodología adecuada por ser sus premisas de cálculo parecidas a la zona de estudio.

La infiltración se ha evaluado a partir de los datos diarios de precipitación, restando la evapotranspiración mensual, dividida entre el número de días del mes correspondiente, y en función de tres parámetros: la Capacidad de Campo (CC), el Punto de Marchitez (PM) y el Umbral de Escorrentía (UE), conceptos definidos en el



glosario (Apéndice 2). Éstos valores se han estimado según las dos hipótesis correspondientes a los extremos más probables mediante la aplicación informática CLIMA (IRYDA, 1990) considerando unas hipótesis de reserva de 40 y 60 mm.



Figs. 2.31 a) y b). Temperaturas medias y precipitaciones medias mensuales del período 1987-2002.

El cálculo se ha realizado por el método directo y el exponencial. Los parámetros empleados en las tablas del Anexo 2.4.2 (presentadas en ese tomo para facilitar su observación simultánea) son:

- Precipitación (P)
- Evapotranspiración de Thornthwaite (EtoTh)
- Precipitación - Evapotranspiración (P-ETP)
- Reserva (R), o volumen de agua no movilizado del acuífero en forma de humedad.
- Incremento de la reserva (VR)
- Evapotranspiración real (ETR)
- Falta (F) o déficit.
- Exceso (Ex)
- Desagüe (D) o escorrentía.

Tras el estudio de los resultados, se ha seleccionado la solución de Thornthwaite por el método directo y con una hipótesis de reserva de 40 mm (Tabla 2.01 y Fig. 2.32).

EST	LOCALIZACIÓN	X	Y	P	EtoPM	P-ETP	ETR	F	Ex
2502	SANTIUSTE	368321	4557110	439.1	706	-266.9	360.3	345.7	78.8

Tabla 2.01. Cálculo de los índices climáticos por el método de Thornthwaite: Evapotranspiración potencial (EtoPM), Lluvia útil (P-ETP), Evapotranspiración real (ETR), falta y exceso de agua (en mm).

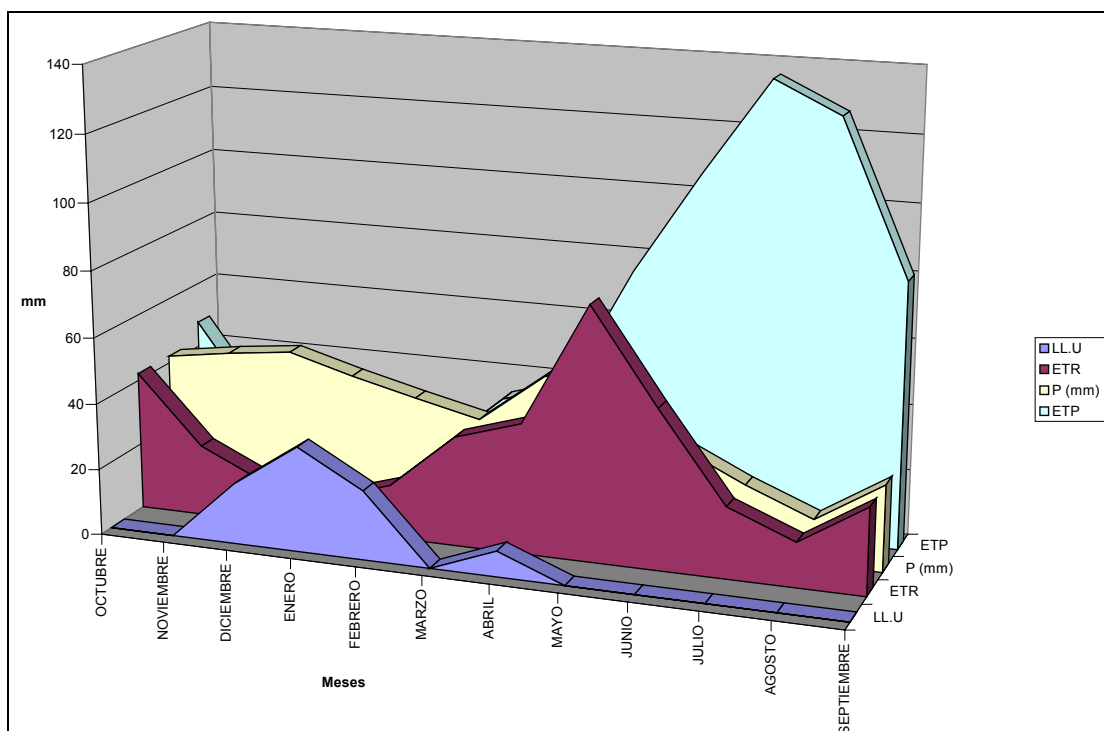


Fig. 2.32. Índices evapotranspirativos calculados para el año tipo medio en la estación 2502 por el método de Thornthwaite con una hipótesis de reserva de 40 mm.

El tratamiento de los datos permite establecer los siguientes intervalos de variación para la zona de la *Cubeta* en el intervalo 1987-2002:

• Precipitación

- Valor máximo: 461,49 mm/año.
- Valor mínimo: 392,36 mm/año.



- Media: 423,90 mm.
- Rango de variación: 69,13 mm.
- **Temperatura**
 - Valor máximo: 37,79°C (3 de agosto de 2002).
 - Valor mínimo: 0,2° C (12 de enero de 2003).
 - Media: 12,51 °C.
 - Rango de variación: 37,77°C.

- **Evapotranspiración Potencial**

- Valor máximo: 738,22 mm/año.
- Valor mínimo: 705,95 mm/año.
- Media: 728,59 mm.
- Rango de variación: 32,27 mm.

- **Evapotranspiración real**

- Valor máximo: 399,51 mm/año.
- Valor mínimo: 347,03 mm/año.
- Media: 378,78 mm/año.
- Rango de variación: 52,47 mm/año.

- **Velocidad del viento media**

El resultado de este índice climático es de 11,26 km/h. La orientación se presenta en la “rosa de vientos” de la Fig. 2.33.

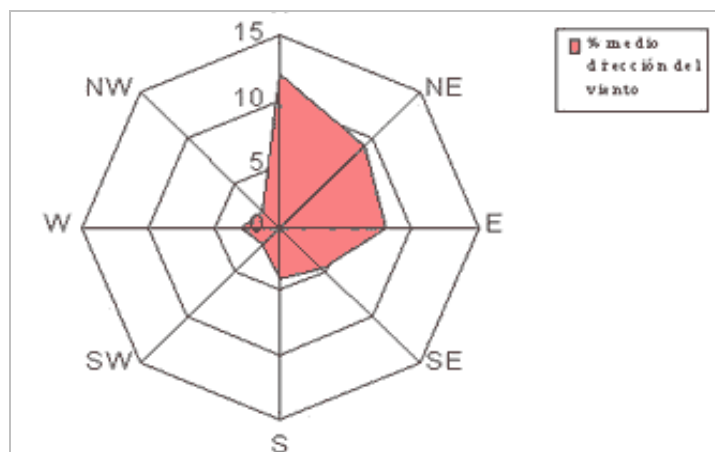


Fig. 2.33. Rosa de los Vientos para la localidad de Coca. Fuente: www.inm.es.

6.3.1. Lluvia útil

Procede de la expresión:

$$Llu = (P - ETR)$$

- Valor máximo: 78,44 mm.
- Valor mínimo: 12,49 mm.
- Media: 44,39 mm.
- Rango de variación: 65,95 mm.

Con estos datos se deduce que la lluvia útil es aproximadamente el 10% de la precipitación total en un año tipo medio de la serie climática, llegando hasta el 17%.

Como metodología de cálculo adicional que permita contrastar los resultados, se ha consultado el modelo de precipitación-aportaciones *HELP (Hydrological Evaluation Landfill Performance)* para el período 1999-2002 elaborado para el ámbito de la *Cubeta (MAPA, 2003)*. Dicho modelo ha sido elaborado para el **cuatrienio 1999-2002** de acuerdo con las premisas y datos de partida siguientes:

La pendiente media del terreno se ha calculado a partir de un mapa de pendientes con la aplicación informática Surfer 8, módulo “Terrain slope”, realizando un tratamiento estadístico de los datos del MDT blanqueado para la superficie de la *Cubeta*. La cota media resultante es 780,59 m y la pendiente superficial media 1,015°, equivalente a 1,2%. Los restantes parámetros precisos para el modelo han sido calculados y son, para la capa ZNS, porosidad total 18%, capacidad de campo de 0,4, punto de marchitez permanente de 0,05 con una conductividad hidráulica vertical de 0,84 m/día (*MAPA, 2003*). Para la ZS, la porosidad es del 20%, con una capacidad de campo de 0,8, un punto de marchitez permanente de 0,1 y la conductividad hidráulica horizontal de 8 m/día (*MAPA, 2003*).

La cubierta vegetal considerada ha sido principalmente para cultivos bajos con buena cubierta vegetal.

De acuerdo con los resultados del modelo de precipitación-aportaciones *HELP*, el valor de la infiltración media es del 85% de la lluvia útil que, a su vez, es el 14,01% de la precipitación media anual del período (423,9 mm). El resultado es 50,47 mm de infiltración. El modelo aporta también información relativa a la infiltración a través del acuitardo terciario, cifrando este volumen un 0,049% de la lluvia útil, lo que equivale a 0,029 mm (*MAPA, 2003*).

Los resultados de los cálculos quedan postergados para el Apto. 9, balance hídrico, donde son aplicados.

7. HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE

El estudio de la red hidrológica superficial se ha dirigido en especial al río Voltoya, origen del agua de la recarga artificial, cauce fluvial vinculado al funcionamiento del acuífero y garante de la disponibilidad de recursos en el futuro para prolongar las operaciones de recarga artificial (AR).

El río Eresma constituye el principal eje de drenaje del sector septentrional del acuífero. Su carácter ganador y encajamiento en el nivel de base margoso a lo largo de su trazado por la zona de estudio conlleva que su estudio haya sido relegado a un segundo plano.

En esta sección se estudian las características físicas y parámetros hidráulicos del río Voltoya y el régimen de circulación y descarga de ambos ríos, postergando el estudio de las fuentes y manantiales en las terrazas de los cauces fluviales y de las relaciones río-acuífero a apartados posteriores.

7.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL RÍO VOLTOYA

Las características físicas de la cuenca del río Voltoya hasta el punto de ubicación del azud han sido calculadas con un GIS Arc/View y el MDT de la cuenca a escala 1:50.000. Los principales parámetros son:

- Superficie = 620 km²
- Longitud = 50,2 km
- Perímetro = 161,62 km.
- Cota máxima = 1.740 m
- Cota mínima = 850 m
- Cota media = 1.130 m
- Gradiente = 1.7%.

El río Voltoya hasta su confluencia con el Eresma funciona como una red de drenaje rápida. En cabecera discurre sobre un sustrato granítico con altas pendientes, por tanto está fuertemente condicionada por los períodos de sequía. Más tarde se adentra en el acuífero de Los Arenales, encajándose sobre él, y marcando en muchos casos el nivel de base el contacto entre los materiales cuaternarios y terciarios. Este contacto se aprecia en los taludes pocos metros por encima del *talveg* del río, donde presentan frecuentes rezumes y una franja de vegetación hidrófila como consecuencia de su alto contraste de permeabilidades (Fig. 2.34).

Se ha revisado la red de estaciones de aforo en la Cuenca del Duero. Hay una única estación en el río Voltoya aguas arriba de la zona de estudio, la *Mediana* (código 2047 AF), emplazada en cabecera a 1.075 m de altitud. La superficie de su cuenca vertiente es de 140 km² frente a los 1.074 km² de la cuenca total y de los 620 km² por encima de una estación de bombeo que se encuentra en fase de construcción. La lejanía de la estación a la *Cubeta* no aporta información relevante en cuanto a los datos de caudales (*MAPA, 1999c*).



Fig. 2.34. Ejemplo del grado de encajamiento del río Eresma a su paso por Villeguillo. Inmediaciones de la estación SAICA A-70 de la CHD.

A este respecto, el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero o PHD (BOE, 1998) dispone de los siguientes datos correspondientes a la estación de aforos E-2047 (río Voltoya en *Mediana*) para una superficie de la cuenca vertiente de 131,90 km².

Los caudales punta obtenidos por diferentes métodos (m³/s) son (Tabla 2.02):

T (AÑOS)	HEC-1	GUMBEL	LOG-PEARSON
5	44,00	37,00	43,00
10	67,00	48,00	56,00
25	101,00	61,00	69,00
50	131,00	71,00	76,00
100	160,00	81,00	82,00
500	230,00	104,00	91,00
1.000	260,00	113,00	93,00

Tabla 2.02. Caudales punta obtenidos por aplicación de los métodos HEC-1, Gumbel y Log-Pearson. Tiempo de retorno (T) en años.

En la misma fuente aparecen los coeficientes de regionalización aplicables a la cuenca del río Voltoya (Sistema Central). La ecuación de regresión es:

$$Q = a \cdot s \cdot b$$

Donde:

- Q = Caudal específico de avenida (m³/s/km²).
- s = Superficie de la cuenca (km²).
- a, b = Coeficientes vinculados al cálculo de un coeficiente de correlación “r”.

Los resultados aparecen en la Tabla 2.03:

T (AÑOS)	A	B	R
5	2,9565	- 0,4560	0,9282
10	6,0974	- 0,4951	0,9558
25	11,3740	- 0,5248	0,9642
50	15,6565	- 0,5352	0,9637
100	20,4870	- 0,5450	0,9655
500	31,6730	- 0,5532	0,9650
1.000	36,3069	- 0,5538	0,9635

Tabla 2.03. Coeficientes de regionalización aplicables a la cuenca del río Voltoya.

La estimación de los **caudales máximos de avenida** en el punto del cauce del río Voltoya en el que está ubicado el **talud de recarga artificial** son (MAPA, 1999c):

- **Fórmula de González Quijano**

$$Q = 17 \cdot S^{2/3}, \text{ si } S = 620 \text{ km}^2$$

$$Q = 1.236,07 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Fórmula de Zapata:**

$$Q = 21 \cdot S^{0,60}$$

$$Q = 994,61 \text{ m}^3/\text{sg}$$

- **Modelo hidrológico HEC-1**

El cálculo se realiza por la relación siguiente:

$$Q_A = Q_{23} \frac{\sqrt{S_A}}{\sqrt{S_{23}}}$$

Donde:

- Q_A = caudal punta (m^3/s) en el punto A.
- Q_{23} = caudal punta (m^3/s) en el punto 23.
- S_A = Superficie de la cuenca aportante al punto A = 620 km^2 .
- S_{23} Superficie de la cuenca aportante al punto 23 = $572,59 \text{ km}^2$.

Los resultados son (Tabla 2.04):

T (AÑOS)	CAUDAL PUNTA (m^3/s)	
	PUNTO 23	PUNTO 1
5	36,46	37,94
10	58,62	61,00
25	90,91	94,60
50	118,35	123,15
100	146,63	152,58
500	216,95	225,75

Tabla 2.04. Cálculo del caudal punta por el modelo hidrológico HEC-1.



- **Método estadístico a partir de aforos**

Resulta de aplicar la misma relación anterior:

$$Q_A = Q_{2047} \frac{\sqrt{S_A}}{\sqrt{S_{2047}}}$$

Donde:

- Q_{2047} : Caudales punta (m^3/s) obtenidos en la estación de aforos E-2047 por aplicación de los métodos de Gumbel y Log-Pearson. (1) y (2).
- S_{2047} : Superficie de la cuenca vertiente hasta el punto de ubicación de la estación de aforos = $131,90 \text{ km}^2$.

Se obtienen los siguientes resultados (Tabla 2.05).

T (años)	CAUDAL PUNTA (m^3/s)	
	GUMBEL	LOG-PEARSON
5	80,22	93,23
10	104,07	121,41
25	132,25	149,60
50	153,93	164,77
100	175,61	177,78
500	225,48	197,29
1000	244,99	201,63

Tabla 2.05. Cálculo del caudal punta por los métodos de Gumbel y Log Pearson para distintos periodos de retorno (T) en años.

- **Método racional**

Se trata de un método sencillo cuyo cálculo requiere conocer la superficie y régimen hídrico de la subcuenca hidrográfica. Los valores del caudal punta obtenidos en el punto de ubicación del azud son (Tabla 2.06):

T (AÑOS)	CAUDAL PUNTA (m^3/s)
5	97,69
10	156,68
25	241,47
50	310,88
100	381,96
500	560,18
1000	639,67

Tabla 2.06. Cálculo del caudal punta por el método racional.



- **Valores adoptados**

Los valores del caudal punta adoptados para sucesivos cálculos correspondientes al azud de toma, del lado de la seguridad, son los siguientes (Tabla 2.07):

T (AÑOS)	Q (m ³ /s)
5	100
10	150
25	250
50	300
100	380
500	560

Tabla 2.07. Cálculo del caudal punta para distintos períodos de recurrencia.

El caudal correspondiente a la “máxima avenida ordinaria” es el equivalente al período de retorno de 5 años, es decir $Q_{MAO} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. El principal problema se presenta cuando la avenida máxima va acompañada de inundaciones en el acuífero, por tanto, el medio no se convierte en un receptor de aguas de escorrentía superficial o de excedentes fluviales, sino todo lo contrario.

Las inundaciones que sobrevienen en situaciones ocasionales causan graves perjuicios en los cultivos (más aún teniendo en cuenta que las operaciones de recarga artificial se llevan a cabo en la estación húmeda). Temporalmente coinciden con períodos en los que el acuífero se encuentra con un grado de saturación importante, especialmente por efecto de la recarga artificial (AR), consecuentemente su capacidad para acoger agua en sus intersticios estará minimizada.

Con objeto de minimizar el impacto ambiental generado, en el Bloque 5 se estudian algunas alternativas prácticas de actuación, considerando como opciones principales la infiltración por pozos abandonados, el almacenamiento en humedales, la inyección profunda y el empleo de la técnica del ASR (*Aquifer Storage and Recovery*).

En cuanto a la calidad de las aguas del río Voltoya en la zona del azud de recarga artificial, de acuerdo con los análisis químicos efectuados, las aguas están escasamente mineralizadas. Este hecho está motivado por la baja inercia del acuífero en cabecera, su pendiente y el hecho de discurrir sobre un sustrato granítico, hasta adentrarse en las arenas eólicas de la Formación Arévalo, de alta concentración en sílice. La composición de éstas en el punto de toma representan un *polo frío*, o polo extremo para los estudios posteriores de pautas de evolución e interacción entre el agua que se infiltra en el sustrato y el acuífero. Este tema es abordado en el Bloque 3 (aspectos cualitativos de las aguas).

El río Eresma funciona como red de drenaje del sector septentrional del acuífero, de acuerdo con los datos obtenidos en los apartados restantes, en especial, el relativo a la elaboración de la cartografía hidrogeológica (Aptdo. 8.3), manantiales del sistema y su funcionamiento (Aptdo. 8.5.2).

Dado que no se pretende captar aguas del río Eresma para las operaciones de AR, no se ha considerado preciso estudiar las posibilidades de disponibilidad hídrica.

La calidad de las aguas del río es controlada en la actualidad tras la construcción de una estación SAICA en Villeguillo en verano de 2002. Se ha llevado a cabo una solicitud de los datos medidos al departamento de calidad de las aguas de la CHD, confirmando de nuevo que se trata de aguas escasamente mineralizadas, en principio aptas para operaciones de AR, excepto por la elevada cantidad de sólidos disueltos y en suspensión, según se comenta en el Bloque 5 al hablar del estándar de calidad de las aguas de recarga.

7.2. CIRCULACIÓN Y DESCARGA EN LOS RÍOS VOLTOYA Y ERESMA

Considerando el modelo conceptual de *Toth* en el que se constata un flujo local (a través del acuífero eólico superficial) y un flujo profundo a través de la Formación Puente Runel a escala de la Cuenca del Duero (con flujos ascendentes locales que condicionan la salinidad de determinados humedales y yacimientos evaporíticos), cabe considerar un flujo intermedio, con tiempos de residencia intermedios y una salinidad de las aguas intermedia también, cuyas líneas de flujo convergen en el río Voltoya desde ambos márgenes. En esta situación cabe esperar un volumen de aportaciones escaso, dado el carácter de acuitardo de baja permeabilidad de las Facies Cuestas.

Ambos cauces fluviales están profundamente encajados en la actualidad, presentando sectores en los que el talud sobrepasa los 50 m de desnivel. En determinados puntos se puede apreciar que el contacto entre los materiales terciarios y cuaternarios es variable, es decir, los cauces se han encajado en el acuífero cuaternario, quedando su nivel de base sobre margas de las Facies Cuestas. Este hecho ocurre principalmente en el sector septentrional, mientras que en el meridional se detectan espesores de arenas de la Fm Arévalo de más de 2 metros de potencia como nivel de base (observaciones propias), lo que indica la necesidad de llevar a cabo un estudio preciso (Aptdo. 7.5).

7.2.1. Aforos secuenciales de los ríos Voltoya y Eresma

Esta metodología permite evaluar la evolución del caudal de base de un río entre puntos consecutivos, con objeto de deducir su carácter y cuantificar sus ganancias o pérdidas. Permite además evaluar el caudal procedente de la margen derecha del río, que se pretende estimar por la diferencia entre el caudal del río circulante a la entrada y salida del acuífero, sustrayendo las aportaciones de la margen derecha.

Los **aforos secuenciales** realizados por el MAPA entre 2002 y 2004 son medidas puntuales que permiten, más que evaluar el caudal del río, evaluar las diferencias cuantitativas en el flujo entre las distintas estaciones de aforo. De este modo se obtiene un criterio adicional para saber si el tramo del río es ganador, perdedor o conservativo.

Las estaciones, numeradas de norte a sur, son (Fig. 2.35):

La estación EA-1 corresponde a la estación SAICA de Villeguillo, donde la CHD ha instalado una regla para la medida del caudal.

La EA-2 corresponde al Puente Grande del río Eresma, a su paso por la localidad de Coca, antes de su confluencia con el Voltoya.

La EA-3 corresponde al Puente Chico del río Voltoya, a la entrada de Coca por el oeste. En este punto hay una estación de aforos de la CHD.

La EA-4 corresponde al puente de la carretera de Santiuste a Nava de la Asunción sobre el río Voltoya, en las inmediaciones del extremo sur de la zona de estudio.

Los datos disponibles hasta la fecha se presentan a continuación (Tabla 2.08).

Nº	X	Y	Z	Q1	T 1	Q2	T 2	Q3	T- 3	Q4	FECHA 4
EA 1	364520	4576283	727.1	2.086,7	05/06/02	786.8	sep-02		22/07/03		10/10/03
EA 1 b	369950	4568841	727.1		05/06/02		sep-02	90 cm	22/07/03	1.100	10/10/03
EA 2	372498	4564655	750	1.456	05/06/02	1071.3	sep-02	675.4	22/07/03	1.001	10/10/03
EA 3	371743	4563573	755.8	78,13	05/06/02	SECO	sep-02		22/07/03		10/10/03
EA 3 b	371678	4563453	755.8		05/06/02		sep-02	48 cm	22/07/03	SECO	10/10/03
EA 4	371146	4556779	777.3	50,73	05/06/02	SECO	sep-02	SECO	22/07/03	10.7	10/10/03
EA 5	372157	4554490	794.5		05/06/02	SECO	sep-02	<2 l/s	22/07/03	10.4	10/10/03

Tabla 2.08. Caudales registrados en las estaciones de aforo.

En general se aprecia que el río es conservativo en su totalidad, al discurrir sobre el sustrato margoso de la Formación Cuestas.

En algunos puntos y períodos específicos, resulta ligeramente ganador. El caudal efluente procede desde el nivel cuaternario colgado, de las terrazas aluviales y por zonas que funcionan como drenes en situaciones de aguas altas, bien sea por años húmedos o por las operaciones de recarga artificial.

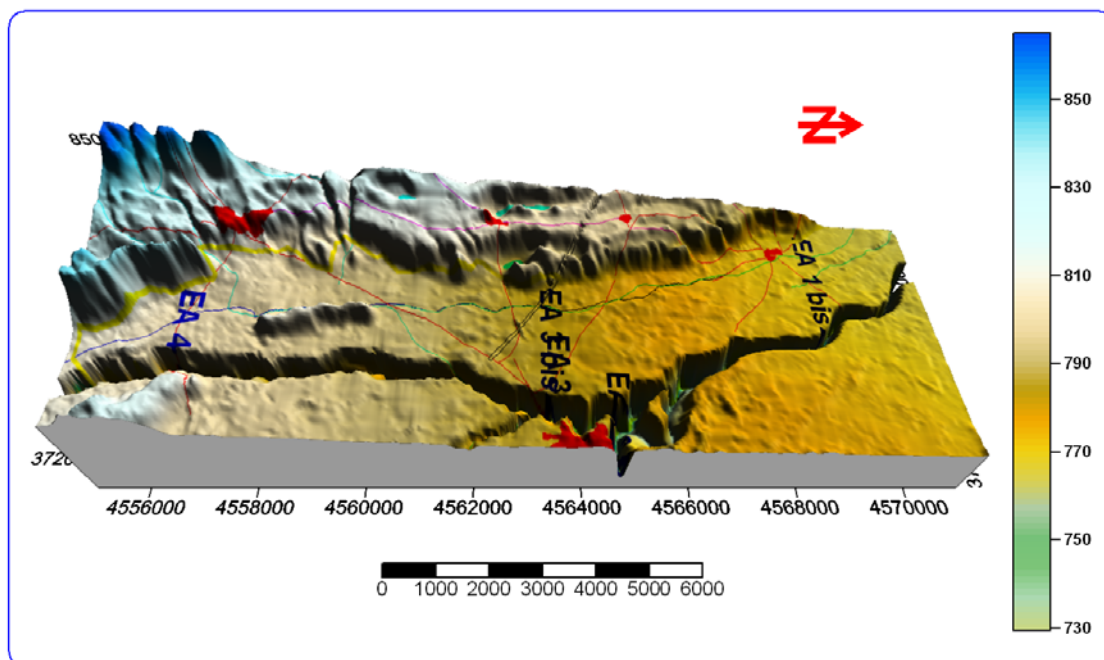


Fig. 2.35. Bloque diagrama con la ubicación de las estaciones de aforo.

8. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL MEDIO

El objetivo principal que promueve este bloque del trabajo de investigación es alcanzar pautas para que las operaciones de recarga artificial tengan máxima efectividad. El conocimiento detallado de la Cubeta de Santiuste permitirá obtener una experiencia patrón para acuíferos análogos susceptibles de ser recargados.

Algunos de los objetivos de este apartado redundan sobre aspectos ya contemplados en estudios previos, si bien se pretende realizar una interpretación paralela de los mismos basándose en nuevos datos disponibles.

En este contexto se proponen seis puntos hidrogeológicos genéricos:

- 1) Inventario de puntos de agua
- 2) Caracterización de los acuíferos (hidroestratigrafía y parámetros hidráulicos)
- 3) Cartografías hidrogeológicas del acuífero superficial y profundo
- 4) Perfiles hidrogeológicos
- 5) Relaciones río-acuífero

El funcionamiento del acuífero (punto seis) es descrito al final del apartado, tras obtener nuevas aportaciones al conocimiento derivadas de la respuesta del acuífero ante las operaciones de recarga artificial, en especial del avance del bulbo de humidificación.

8.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Como punto de partida para cualquier estudio hidrogeológico, se ha realizado un inventario de puntos de agua en la Cubeta de Santiuste con la mayor exhaustividad posible.

Con objeto de llevar a cabo un seguimiento de la evolución de la *Cubeta* y del acuífero fueron diseñadas tres redes de control. Para ello fueron seleccionados los puntos de agua de características más idóneas entre los 228 puntos de agua inventariados por el MAPA en 1999 (*MAPA, 1999a*). Este inventario estaba integrado por cuatro *charcas*, 144 pozos (de los cuales ocho estaban secos en el verano de 1999, pero no en 1990), 26 pozos-sondeo y 54 *minisondeos*³ o sondeos profundos (de los que fue imposible acceder a cuatro) 11 de los cuales tienen columna litoestratigráfica disponible bien testificada.

Este inventario ha sido ampliado durante la realización del presente estudio hasta 335 puntos (excluyendo los manantiales y los humedales del *Complejo* que quedan en el exterior de la *Cubeta*).

Tras esta ampliación, el inventario consta de 51 sondeos profundos, 26 minisondeos, 25 pozos-sondeo, 18 piezómetros de observación de las redes de control del MAPA, 174 pozos, 25 fuentes, manantiales y rezumes de cierta permanencia, y cinco

³ Los minisondeos son captaciones específicas características de la zona de estudio descritas en el apartado siguiente.

charcas (que corresponden a los principales humedales comprendidos dentro de la *Cubeta*). Los restantes humedales del *Complejo* no han sido incorporados en el inventario de puntos de agua, si bien cuentan con un inventario específico en el Bloque 4.

8.1.1. Pozos

Se distinguen tres tipologías de pozos diferentes:

- 1) Pozos excavados. Se trata de pozos excavados convencionales revestidos con ladrillo, bien sea prismático o en bóveda, bien con anillos de hormigón.
- 2) Pozos-sondeo, que corresponden a pozos de gran diámetro con un sondeo perforado en el fondo. Se trata de una captación de carácter intermedio entre un pozo y un sondeo. Su origen es un pozo antiguo en el que, tras comenzar el descenso generalizado del nivel freático en la zona, el propietario optó por aprovechar la misma captación aumentando su profundidad. Se trata de un tipo de punto de agua bastante común en la zona y de gran importancia a efectos de recarga de acuíferos.

El nivel del agua oscila entre 1 y 7 metros, con una media de 4,20 con respecto al nivel medio del terreno (media aritmética de las medidas realizadas en el año hidrológico 2002/03).

Cabe destacar que algunos de estos puntos, que corresponden a pozos de gran diámetro, se encuentran secos en la actualidad por haber quedado descolgado el fondo con respecto al descenso progresivo del nivel freático. Algunos de estos pozos han sido rellenados de arena por sus propietarios, desapareciendo. Otros, todavía presentes, presentan una perforación complementaria en el fondo (vid. fotografías del Apéndice 3).

8.1.2. Sondeos

Se pueden distinguir minisondeos y sondeos profundos. Los primeros explotan al acuífero superficial, cuyo estudio es el principal objetivo de este bloque. Los sondeos profundos explotan al acuífero regional.

- 1) Minisondeos. Nombre que reciben en la terminología local aquellas perforaciones de 400-500 mm de diámetro y 25-30 m de profundidad media, realizadas normalmente a percusión y entubadas con tubería de 300-350 mm de diámetro por lo general. Los tramos filtrantes suelen aparecer a partir de los 10 m de profundidad y con prefiltro de gravilla calibrada. Este tipo de captación se concentra mayoritariamente en la parte central del acuífero oeste, en Villagonzalo y Ciruelos de Coca. El agua se extrae mediante bombas de eje vertical.
- 2) Sondeos profundos. Hay varias tipologías y el intervalo de profundidades es amplio. Los más profundos suelen presentar un nivel piezométrico representativo del acuífero regional, salvo raras excepciones. En nivel del agua oscila en general entre 40 y 60 metros. Estos puntos han sido empleados para elaborar la cartografía hidrogeológica del acuífero profundo.

- 3) Piezómetros de observación. Puntos de agua correspondientes a perforaciones de investigación realizadas por el MAPA a testigo continuo entre 1999 y 2003. Su diámetro oscila entre 96 y 108 mm, están revestidas con tubería ranurada de PVC, cuentan con tapón de fondo y tapadera metálica con candado (en seis casos) o roscada.

8.1.3. Manantiales

Se ha prestado especial atención al inventario de fuentes y manantiales en las terrazas de los cauces fluviales con objeto de detectar las zonas puntuales de drenaje del acuífero, profundizando en el conocimiento de su funcionamiento, y, por ende, geometría.

El inventario de manantiales y fuentes ha sido desglosado en dos tipos. Por un lado, aquellos situados en el interior de la *Cubeta*, que generalmente drenan pequeños acuíferos cuaternarios colgados, y por otro, los situados en los taludes de los ríos Voltoya y Eresma.

Entre los del primer tipo destacan las fuentes asociadas a los “polos fríos” o entradas de agua al sistema desde el exterior. Entre estos cabe señalar la *Fuente de Torrecilla* y el *Caño El Vallejo*, entradas de aguas a la *Cubeta* por el suroeste en la vaguada del arroyo de la Ermita. Hay dos fuentes más por las que entra un caudal de agua por la margen oeste de la *Cubeta*. Las tres fuentes restantes son de escaso caudal, aunque cuentan con gran aprecio por parte de la población local a pesar de que en varios casos sus aguas no son potables en la época estival por contaminación bacteriológica (comunicación verbal del encargado municipal).

El inventario de las fuentes del segundo tipo se ha realizado con la mayor exhaustividad posible, contando para ello con datos de encuestas y visitas guiadas. El resultado se presenta en el anexo 2.5 desglosado del inventario total.

Ejemplos de estas tipologías de captaciones se presentan en el reportaje fotográfico del Apéndice 3.

El inventario de puntos de agua total se adjunta en el Anexo 2.5. La tabla tiene la estructura siguiente:

- N° f. Numeración definitiva del punto de agua tras ser numerados por su latitud. El punto situado más al norte es el número uno y el más al sur el n.º 330.
- X e Y. Coordenadas UTM tomadas con GPS monofrecuencia o por referencias bibliográficas apoyadas en estudios topográficos.
- Z. Altitud del punto de agua en metros sobre el nivel del mar. Algunas captaciones cuentan con nivelaciones topográficas. La cota de la mayoría de los puntos ha sido calculada a partir de la intersección del MDT de precisión con la posición de cada punto.
- NAT. Naturaleza de la captación, de acuerdo con los grupos genéricos descritos.
- Prof. (m). Profundidad de la captación con respecto al nivel medio del terreno (nmt).
- N.E. (m). Profundidad del nivel del agua respecto al nmt.
- I z (cm). Altura del brocal.
- NE (msnm). Cota de la capa freática en cada captación.
- Fecha. Día en que fue medida la referencia anterior.

- USO. Uso y destino de las aguas cuando se conoce.
- Litol. Litología del acuífero en la zona de la captación.
- C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Conductividad del agua de la captación en la fecha mencionada con posterioridad.
- pH. Medido en el agua de la captación.
- T.^a ag/ T.^a air. Temperaturas del agua y aire en grados centígrados.
- FECHA. De determinación de los parámetros hidroquímicos.
- FACIES. Facies hidroquímicas (en caso de disponer de análisis químicos).
- Q (l/s). Caudal en el caso de fuentes y manantiales.
- Fecha. De la determinación del caudal de la columna previa.
- Toponimia/observaciones.

8.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

8.2.1. Hidroestratigrafía

La división de la *Cubeta* en la vertical presenta tres formaciones de comportamiento hidrogeológico diferente, cuyo estudio es imprescindible para cumplir los objetivos del estudio. De acuerdo con la terminología adoptada en estudios previos, serán designados *acuífero superficial*, *intermedio* y *profundo*.

8.2.1.1. *Acuífero superficial*

Se trata de un acuífero cuaternario de espesor variable, de unos 11 km de largo por unos 2 km de ancho de geometría compleja y bastante conocida. Presenta dos ramales o sectores longitudinales de 0,8 y 0,7 km de anchura, conectados en los extremos con afloramientos de margas que lo delimitan.

Las formaciones cuaternarias eólicas, aluviales y carbonatadas lacustres que constituyen el acuífero superficial presentan espesores máximos de 37,70 m, constatados por métodos directos en el sondeo n.º 6 de la RCR, y hasta 40 m en el sondeo de testigo continuo SW-12 del MAPA (correspondiente al punto de agua n.º INV-34 del inventario presentado en el Anexo 2.5), perforado en la zona de rebosadero del acuífero, al norte de Villeguillo (véanse los anexos 2.5 y 3.2.1).

Por métodos indirectos se han detectado espesores de hasta 52 metros de facies cuaternarias (sin constatar mediante perforaciones) en el depocentro de las cubetas de máximo espesor sedimentario, deducidas a partir de la interpretación de los datos obtenidos en las campañas de prospección geofísica y presentadas en el mapa de isopacas del aptdo. 5.5 (Fig. 2.28). A este respecto, cabe destacar que se ha detectado un comportamiento geoelectrico parecido en la zona transicional del terciario al cuaternario, que podría corresponder a un nivel margoso alterado y entremezclado con las facies arenosas eólicas.

Estas cubetas se ubican en zonas puntuales y ajustándose a paleorrelieves intensos, con una distribución preferente en un eje de orientación parecida al trazado del arroyo de la Ermita. Observando el mapa de isopacas (Fig. 2.28) se aprecia que los mayores espesores del acuífero se ubican en el sector oeste de la *Cubeta*, mientras que en el sector este los depocentros alcanzan los 25 m de potencia máxima.

En el ramal oeste, los espesores máximos quedan ubicados en los extremos noroeste (rebosadero del acuífero) y sureste de la *Cubeta*, así como en las inmediaciones de Villagonzalo de Coca, donde se encuentra el depocentro de la misma, en un sector transicional entre la *Cubeta* y la máxima concentración de humedales del sistema Coca-Olmedo de la zona de estudio. Se trata, por tanto, de un sistema genéticamente mixto fluvial y lacustre, de agreste paleorrelieve, como confirma la testificación de los sondeos, con abundancia de niveles carbonatados.

En el ramal este hay una cierta concentración de cubetas que también se han adaptado al relieve preexistente.

Debido a las características texturales de los depósitos, suelen tener alta permeabilidad, pero a su vez, una cierta heterogeneidad y anisotropía.

El acuífero superficial es importante por su alta capacidad de almacenamiento, pero la existencia de canales de arenas y gravas y de niveles de limos y arcillas le confieren un comportamiento diferencial, lo que complica interpretar su funcionamiento a partir del conocimiento de su geometría.

En el sector central de la *Cubeta* se aprecian pasadas de gravas aluviales entre los 2 y 4 metros de profundidad. Estos niveles se interpretan como facies aluviales recientes del arroyo de la Ermita. Afloran en el caz de recarga artificial en el tramo situado al este de Villagonzalo de Coca, desde la Dehesa Tetuán hasta el Corvazo, al sureste de Ciruelos.

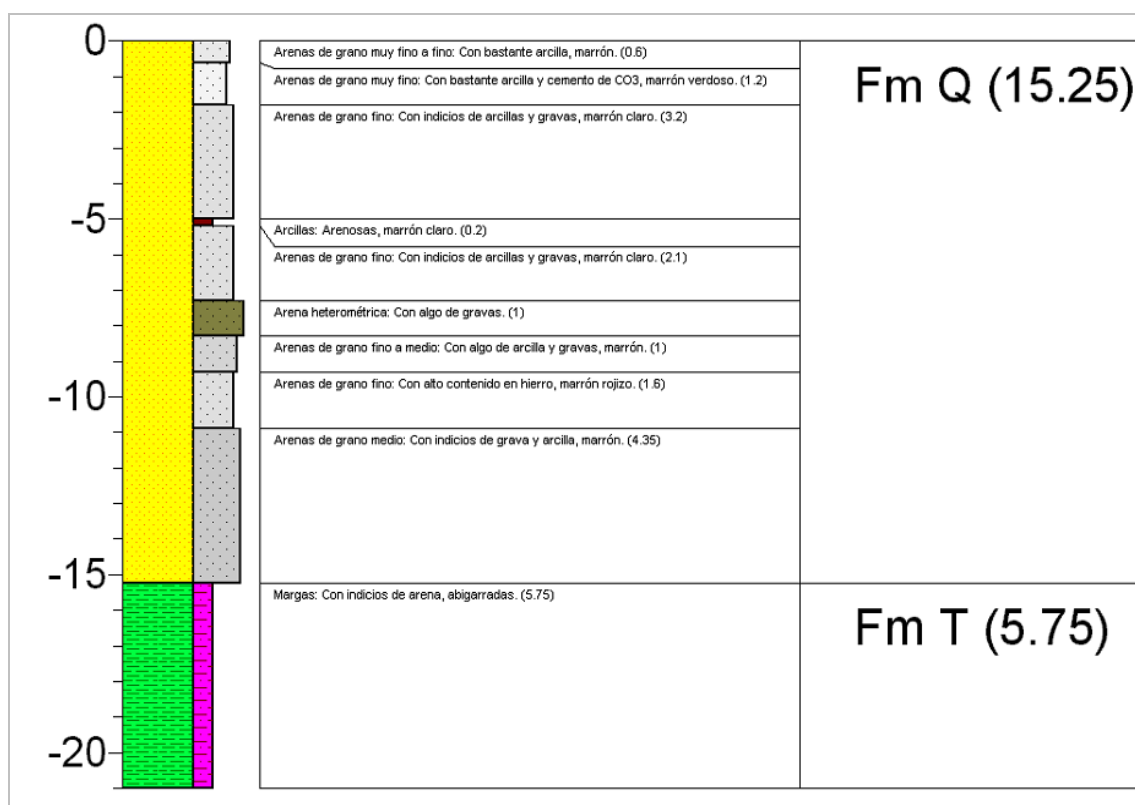
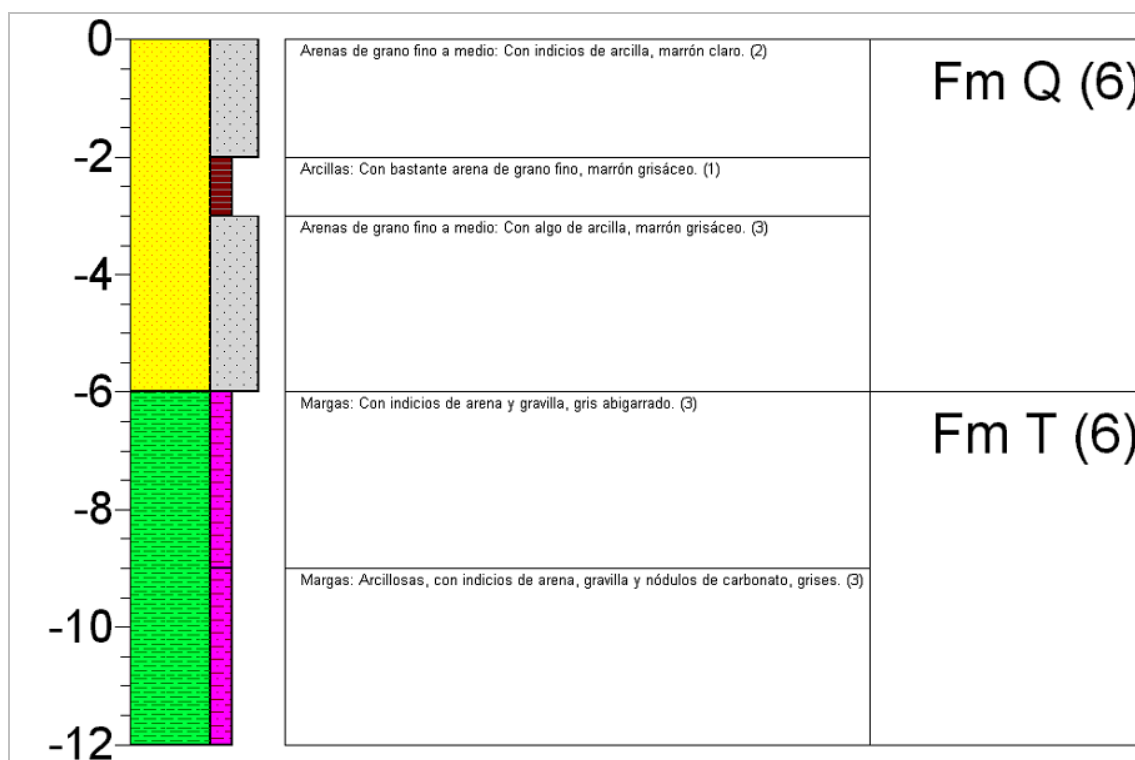
Coincidiendo con la orientación de los meandros del río Voltoya y de lineamientos de herencia tectónica, se han detectado zonas del acuífero drenadas hacia los cauces fluviales con mayor velocidad que en las zonas circundantes. Estos drenes coinciden con la zona del lavadero de Santiuste de San Juan Bautista, y con la cacera de Betaya, que, a través del pinar del Sanchón, desemboca en el antiguo Molino del Batán, drenando las aguas del ramal este tanto por vía superficial como subterránea. Este drenaje ha sido percibido por la evolución del bulbo de humidificación durante el primer ciclo de recarga artificial, por la presencia y estudio del funcionamiento de manantiales de los taludes de los ríos y por la elaboración de una cartografía de isopermeabilidades con datos puntuales. Estas hipótesis son abordadas y razonadas en el Apto. 6.2.6.

La hidroestratigrafía del acuífero superficial ha sido reconstruida en base a las 26 columnas litológicas recopiladas en la zona de estudio, cuya testificación detallada se presenta en el Anexo 3.2.1.

Con estos datos se han sintetizado además dos “columnas tipo” para el acuífero superficial, correspondientes a los puntos de agua 158 y 184 (Figs. 2.36 a y b).

La primera corresponde a niveles arenosos con pasadas arcillosas y gravillas, atribuibles en gran medida a desbordamientos históricos de los cauces fluviales preexistentes que drenaban un sistema dunar eólico salpicado de marjales. Corresponde a un sistema genético eólico y fluvial.

La segunda presenta, además, niveles carbonatados, que en el sector occidental de la *Cubeta* presentan una salinidad elevada. Corresponde a un sistema genético mixto eólico, lacustre/lagunar y fluvial.



Figs. 2.36 a) y b). Columnas litoestratigráficas “tipo” para la Cubeta de Santiuste. Corresponden a los sondeos 184 y 158.

8.2.1.2. *Acuífero intermedio*

Las facies comprendidas entre ambos acuíferos (Facies Cuestas) presentan un comportamiento de acuitardo o acuífugo de baja a muy baja permeabilidad y una elevada heterogeneidad y anisotropía.

En las perforaciones realizadas se aprecia la alta irregularidad de esta serie, aunque han sido detectados pequeños estratos decimétricos tobáceos y de otras litologías permeables en torno a los 70 m de profundidad (*MAPA, 1999a*), constituyendo un acuífero de escaso espesor, cierta continuidad lateral y quimismo peculiar.

8.2.1.3. *Acuífero profundo*

El acuífero profundo se desarrolla en las Facies Puente Runel, en relación con el nivel de saturación regional, formando parte del sistema acuífero n.º 8 o Terciario Detrítico Central del Duero. En el área de estudio el acuífero profundo se encuentra desconectado hidráulicamente del acuífero superficial, observándose una cierta miscibilidad a través de sondeos penetrativos que intercomunican las distintas formaciones, produciendo que el acuífero superficial tenga funcionamiento de “acuífero colgado” en algunas zonas.

Los sondeos de la zona de estudio captan este nivel en torno a los 60 m de profundidad. Con la información disponible se ha generado una cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo (Aptdo. 6.2.5). En ellos se aprecia que las líneas de flujo tienen una orientación que oscila entre este hacia el oeste o bien sureste-noreste, con variabilidad espacial y temporal. El gradiente hidráulico queda comprendido entre el 3 y el 8‰ en los sectores noroeste y central respectivamente. La primera observación es coincidente con los datos bibliográficos consultados para el acuífero de Los Arenales a escala regional (*en CHD, 2001 y MIMAM, 2002*), según los cuales el gradiente oscila entre el 2 y 3‰. El sector central está influenciado por la recarga artificial (AR), de ahí que el gradiente obtenido sea superior al previsto (Aptdo. 8.3.3).

De acuerdo con la información disponible, el funcionamiento de la zona parece ajustarse a un modelo conceptual de tipo *Toth* (según se deduce de observaciones propias y de las conclusiones de ciertos autores, como *Rey Benayas, 1991*).

8.2.2. **Parámetros hidráulicos**

En cuanto a los **parámetros hidráulicos** del acuífero superficial, los datos disponibles proceden, en su mayor parte, de ensayos de bombeo en sondeos, ensayos de infiltración en balsas y ensayos en laboratorio sobre muestras inalteradas extraídas en perforaciones. Los datos correspondientes a los acuíferos intermedio y profundo son escasos y, casi siempre, proceden de referencias bibliográficas.

8.2.2.1. *Acuífero superficial*

Según datos bibliográficos, la transmisividad está comprendida entre 305 y 563 m²/día en el sector norte, y entre 201 y 678 m²/día en el sur [media a alta en ambos



casos según los baremos del IGME (*Anexo 2.6, en Villanueva e Iglesias, 1984*]. Predominan los valores en torno a 250 m²/día (también media a alta) (*IRYDA, 1990; MAPA, 1999a*).

Los ensayos realizados por el SGOP en 1994 en la *Cubeta* aportan valores de permeabilidad entre 2 y 30 m/día (*MOPTMA, 1994*), es decir, media a alta también.

Se ha obtenido información de 10 ensayos de bombeo realizados por el MAPA en 1999, que fueron interpretados por el método de Theis (*MAPA, 1999a*) y reinterpretados con posterioridad por el método de Newman. Los parámetros calculados oscilan entre 12,5 y 66 m/día para la permeabilidad, con mayor concentración de valores en torno a los 25 m/día (de nuevo, media a alta).

La interpretación de los seis ensayos de infiltración realizados *in situ*, de los 16 ensayos *Lefranc* practicados en laboratorio (*MAPA, 1999a*) y de los 18 más realizados en 2003 (*MAPA, 2003*), aportan unos valores para los parámetros hidráulicos que oscilan entre 3 y 30 m/día para la permeabilidad horizontal, con una transmisividad de 240 a 678 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0,11 a 0,28 con un promedio del 18,6 %.

El estudio del IRYDA de 1990 aporta los datos relativos a los parámetros hidrogeológicos siguientes: los valores de permeabilidad calculados para el acuífero de la Cubeta de Santiuste a partir de ensayos de permeabilidad *in situ* (interpretados mediante la fórmula de *Hvorslev*) desprendieron valores bastante homogéneos, comprendidos entre 32 y 67 m/día y un valor medio de 41 m/día (*IRYDA, 1990*).

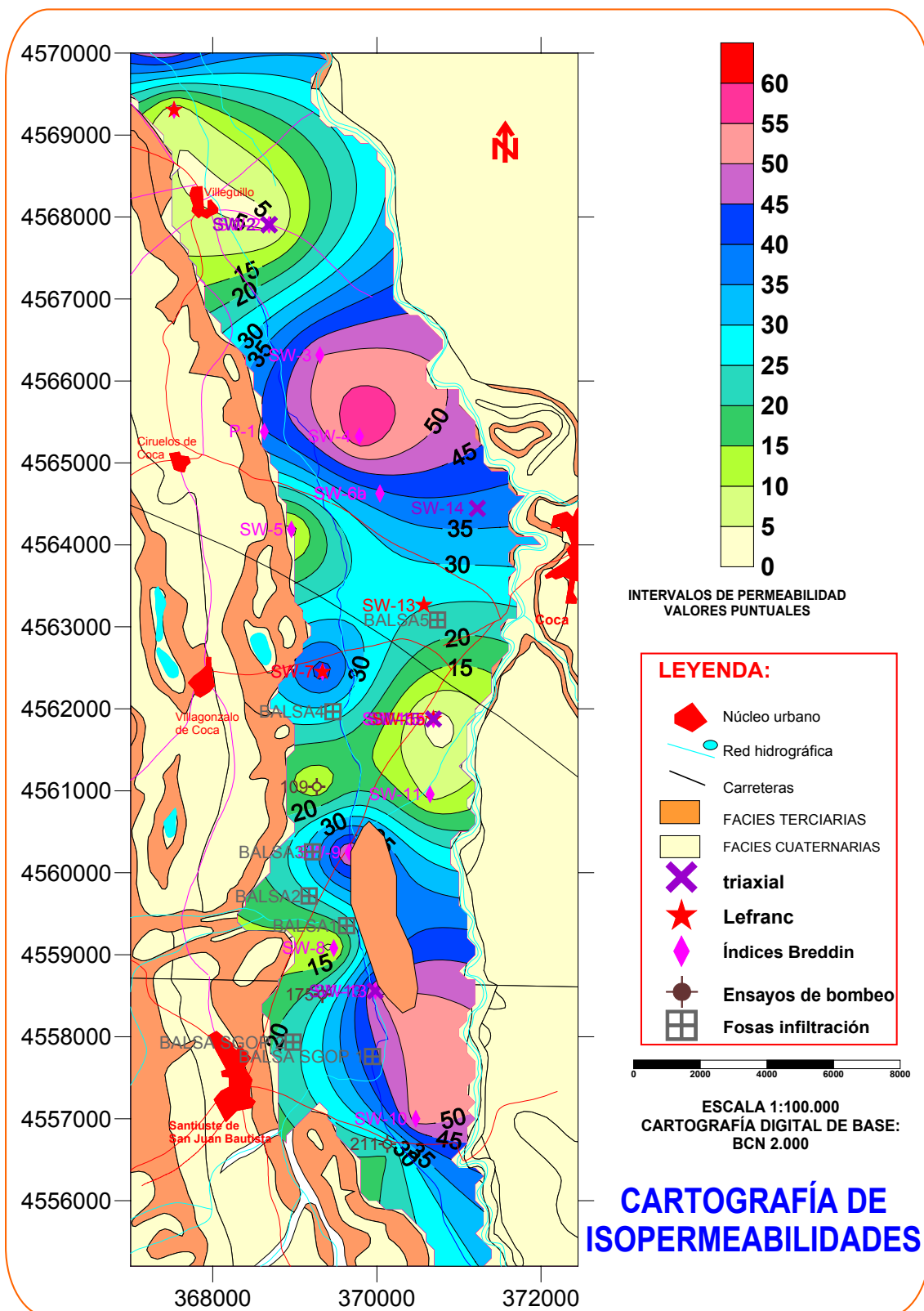
Los parámetros hidrogeológicos calculados para el acuífero de la Cubeta de Santiuste aparecen resumidos en la Tabla 2.09:

PARÁMETRO HIDROGEOLÓGICO	IRYDA 1990	MAPA 1999	OBSERVACIONES
Transmisividad (m ² /día)	305-563	240-678	Coincidente con resultados del CEDEX, 1994.
Permeabilidad vertical (K _v) (m/día)		2,97-30,19	MOPU, 1990: 3 m/día. SGOP, 1994: 6-10 m/día. Laboratorio: 0,0025-77,76.
Permeabilidad horizontal (K _h) (m/día)	32 - 67	0,24-16,8	Valor medio de 41 m/día.
Coeficiente de almacenamiento	0,15	0,11- 0,28	Valor promediado de 18,6%.

Tabla 2.09. Parámetros hidrogeológicos calculados para el acuífero superficial de la Cubeta de Santiuste (diversas fuentes).

Estos baremos son bastante representativos de la realidad física del acuífero, si bien, es preciso llevar a cabo una desagregación de los mismos. Para ello se han ubicado espacialmente los datos disponibles y generado una **cobertura digital distribuida** para el estudio de la dispersión de los parámetros hidráulicos, especialmente la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. La extrapolación de datos puntuales conlleva un margen de error relativamente alto en acuíferos de cierta anisotropía, no obstante, permite una primera aproximación a su realidad física. La cobertura digital relativa a la distribución de la permeabilidad en el acuífero superficial (Fig. 2.37) ha sido elaborada con datos bibliográficos de ensayos de bombeo e infiltración (*en IRYDA, 1990, MOPTMA, 1994, MAPA, 1999 a y b, Galán et al, 2001b y MAPA, 2003*), así como ensayos de permeabilidad realizados en el primer trimestre de 2004.

Fig. 2.37. Cartografía de distribución de los parámetros hidráulicos en la Cubeta de Santiuste (página siguiente)





El tratamiento estadístico de la malla generada desprende los siguientes resultados: el rango de permeabilidades horizontales teóricas oscila entre 3,47 y 58,97 m/día para el acuífero eólico cuaternario, con una mediana de 29,39 y una media de 30,44 m/día.

Los valores parecen algo sobredimensionados para operaciones de recarga artificial con infiltración forzada durante cinco meses al año, ya que la mayoría de los datos han sido extraídos de ensayos de bombeo, ensayos indirectos realizados en laboratorio, ensayos de infiltración *Lefranc* o ensayos en fosas de hasta cuatro días de duración, cuando lo recomendable es calcular la infiltración durante al menos un año (*Dillon et al*, 2002). En consecuencia, la mayoría de los datos han sido obtenidos en experimentos de “corta duración” con respecto al período de recarga artificial previsible.

Como ejemplo, se muestran los resultados de los ensayos de permeabilidad mediante fosas de infiltración realizados por el MAPA en 1999. En la balsa número uno se obtuvo un valor de permeabilidad $K = 6,08$ m/día; en la número dos, $K = 3,66$ m/día; en la balsa número tres, $K = 2,97$ m/día; en la balsa número cuatro $K = 30,19$ m/día y en la balsa número cinco $K = 4,64$ m/día. La ubicación de estas fosas se presenta en la Fig. 2.37. Nuevos ensayos realizados en febrero de 2004, tras 50 días de recarga artificial, desprenden unos resultados de permeabilidad vertical ligeramente inferiores a 1 m/día, con un valor medio de 0,84 m/día (*MAPA*, 2003), resultados sensiblemente menores que los obtenidos en ensayos de corta duración.

Estudiando esta cartografía y su cobertura digital correspondiente, se aprecia que la distribución de la permeabilidad es más propia de un acuífero heterogéneo y anisótropo de lo que cabe esperar en un medio mixto eólico-fluvial-lagunar. Los valores de permeabilidad mayores se ubican en la mitad oriental, al este de Santiuste de San Juan Bautista y noroeste de Coca, en zonas con escasez de captaciones, al estar ocupadas por pinares.

Uno de los principales condicionantes de la distribución de la permeabilidad es la profundidad de las Facies Cuestas en cada sector. En general, se aprecia que aquellas zonas en las que las Facies Cuestas se encuentran a poca profundidad presentan permeabilidades menores, como ocurre en la cacera de Betaya, y también en el sector occidental de la *Cubeta* en las inmediaciones de las colinas de margas terciarias, posiblemente por presencia de formaciones tipo piedemonte. En este sector presenta mayores valores en las inmediaciones de zonas con emplazamiento de humedales y concentraciones anómalas de sales en zonas endorreicas (al este de Ciruelos y Villagonzalo de Coca).

Al sobreponer la cobertura de isopermeabilidades (Fig. 2.37) al mapa de isopacas (Fig. 2.28) no se aprecia relación directa, excepto en el sector septentrional, donde los valores máximos son coincidentes con las depresiones del paleorrelieve.

El sector central (alineado con la cacera de Betaya) funciona como un umbral, motivado por la cercanía de las Facies Cuestas en el sustrato. Este umbral se ha interpretado como consecuencia de un proceso de levantamiento tectónico del basamento.

De los datos presentados, se deduce que el acuífero eólico superficial en facies de la Formación Arévalo presenta en su conjunto un comportamiento libre, aunque parece haber niveles confinantes locales y variaciones importantes dentro de la *Cubeta*. A pesar

de ser aparentemente homogéneo e isótropo, presenta una cierta heterogeneidad y anisotropía, motivadas por los frecuentes lentejones arcillosos, paquetes de gravas y cambios laterales de facies.

A efectos prácticos, analizando los datos disponibles, considerando una relación $K_v/K_h = 0,1$ para el acuífero superficial (Fm. Arévalo), el valor de la permeabilidad horizontal (K_h) oscila entre 15 y 30 m/día, con una capacidad de infiltración media para este acuífero de 0,64 (MAPA, 2003) a 3 m/día (MAPA, 1999a).

Con estos valores, es posible una recarga en superficie de 243 l/s en una zona de 7.000 m² de extensión. Para los 441 l/s de recarga necesarios el primer año haría falta una superficie de 12.700 m² (MAPA, 1999 b y c). Las consecuencias de este cálculo serán comentadas en el Apto. 10 (recarga artificial).

8.2.2.2. Acuífero intermedio

La permeabilidad del acuitardo terciario (Facies Cuestas) varía entre $1,1 \cdot 10^{-6}$ y $9,8 \cdot 10^{-7}$ m/día, lo que representa velocidades de infiltración inferiores a $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/día (Galán de Frutos, 1995).

8.2.2.3. Acuífero profundo

En cuanto a los parámetros hidrogeológicos del acuífero profundo, hay registrados valores de permeabilidad vertical de $5 \cdot 10^{-4}$ (MAPA, 1999a) y 0,00005 m/día (MOPTMA, SGOP, 1994). El coeficiente de almacenamiento específico asignado ha sido $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ para todos los acuíferos confinados y de 2 % para los acuíferos libres (MIMAM, 2002).

En general, hay una fuerte escasez de datos de los parámetros hidráulicos de las formaciones inferiores.

8.3. CARTOGRAFÍAS HIDROGEOLÓGICAS

El estudio de la evolución de los niveles en el acuífero se ha llevado a cabo mediante el seguimiento de una red de control de la piezometría (RCP) para el control del nivel freático en todo el acuífero. Esta red constituye, junto con el inventario de puntos de agua y el estudio de la red de drenaje superficial, el punto de partida para la elaboración de cartografías hidrogeológicas.

8.3.1. Red de control de la piezometría

La red originaria diseñada por el MAPA en 1999 estaba constituida por 39 puntos de agua, 31 captaciones superficiales y ocho sondeos profundos. Fueron seleccionados por los criterios siguientes:

- Profundidad variable.
- Los puntos son representativos del nivel freático regional del acuífero superficial y profundo, mientras que además permiten controlar distintos niveles de los compartimentos del acuífero multicapa.
- Permiten discretizar sectores dentro del área por su comportamiento hidrogeológico diferencial (zonas de recarga y descarga) o por su quimismo.
- Están distribuidos de manera tal que cubren una malla que no deja sectores sin información piezométrica y química.
- Generalmente tienen escaso uso y buen acceso.

La red RCP cuenta con 11 mediciones desde 1999. En 2003 la RCP fue rediseñada, incluyendo nuevos puntos y rechazando algunos por resultar de baja representatividad (*en MAPA, 2003*), llegando a 39 captaciones. Para el desarrollo del presente trabajo han sido medidos 15 puntos más en zonas que quedaban insuficientemente definidas. De los 54 puntos de agua de la RCP ocho sobrepasan los 50 m de profundidad. La nueva red está dotada de un carácter dinámico ante posibles modificaciones.

Las medidas disponibles se presentan tabuladas en el Anexo 2.7.1. La primera tabla corresponde a las características del punto y la segunda a las mediciones. Ambas se ajustan al siguiente formato:

- Numeración de la Red de Control de la Piezometría.
- Numeración del inventario actual.
- Coordenadas X, Y y Z.
- Naturaleza de la captación (ver leyenda adjunta al pie de la ficha).
- Profundidad de la captación.
- Fecha de la medición.
- Uso de la captación (ver leyenda adjunta al pie de la ficha).
- Conductividad medida en campo.
- pH obtenido en campo.
- Temperatura del agua.
- Temperatura del aire.
- Fecha de la determinación de los parámetros inestables.



- Fechas de medida.
- Altitud de la capa freática con respecto al nivel del mar.

En la cartografía 2.38 se muestra la ubicación de los puntos que constituyen las tres redes de control, la RCP, la RCR, definida en el Aptdo. 10.2, y la RCH, definida en el Bloque 3 y Anexo 3.1.2.

A partir del análisis de los antecedentes, y de las mediciones llevadas a cabo en la RCP, se han elaborado cartografías diferentes para el acuífero superficial, acuífero donde está centrado el estudio, y para el profundo o regional. Previamente a su elaboración se presentan y comentan las cartografías previas con mención expresa de su fuente.

8.3.2. Acuífero superficial

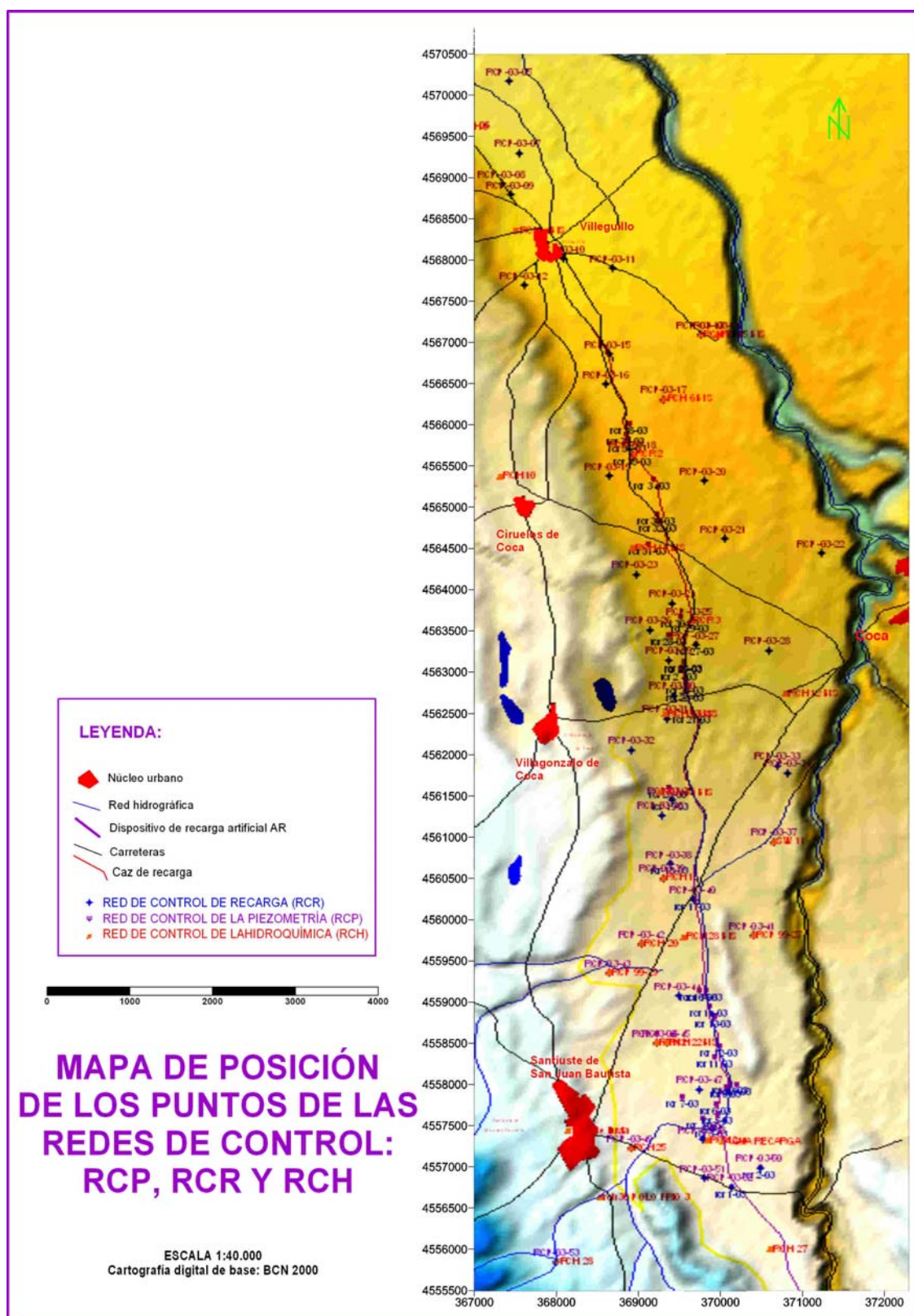
La elaboración de la cartografía hidrogeológica parte de las medidas del nivel del agua registradas periódicamente entre los años 1999 y 2004. La existencia de cartografías seriadas permite afinar en el conocimiento del comportamiento hidrogeológico del sistema entre los períodos de aguas altas y bajas.

El punto de partida ha sido el inventario de captaciones registrado por el MAPA (*MAPA, 1999a*), de las concesiones otorgadas que se ajustan a las normas técnicas estudiadas por la CHD (*CHD, 2001*) y del seguimiento de las redes de control de la piezometría definida en la zona, bien sea la inicial del MAPA (*en MAPA, 2003*) o la ampliada.

Como aproximación preliminar se ha analizado la cartografía hidrogeológica del sistema en **régimen seminatural** (teniendo en cuenta los bombeos, pero no las operaciones de AR). Para ello se ha contado con la cartografía realizada por el IRYDA (*IRYDA, 1990*), y especialmente la diseñada por el MAPA (*en MAPA, 1999a*).

Esta última fue realizada a partir del inventario de captaciones para la situación de mayo a julio de 1999, en el que fueron inventariados y medidos 228 puntos de agua. Ambas cartografías se presentan en las Figs. 2.39 y 2.40).

Fig. 2.38. Mapa de posicionamiento de los puntos de agua que constituyen las redes de control (Página siguiente).





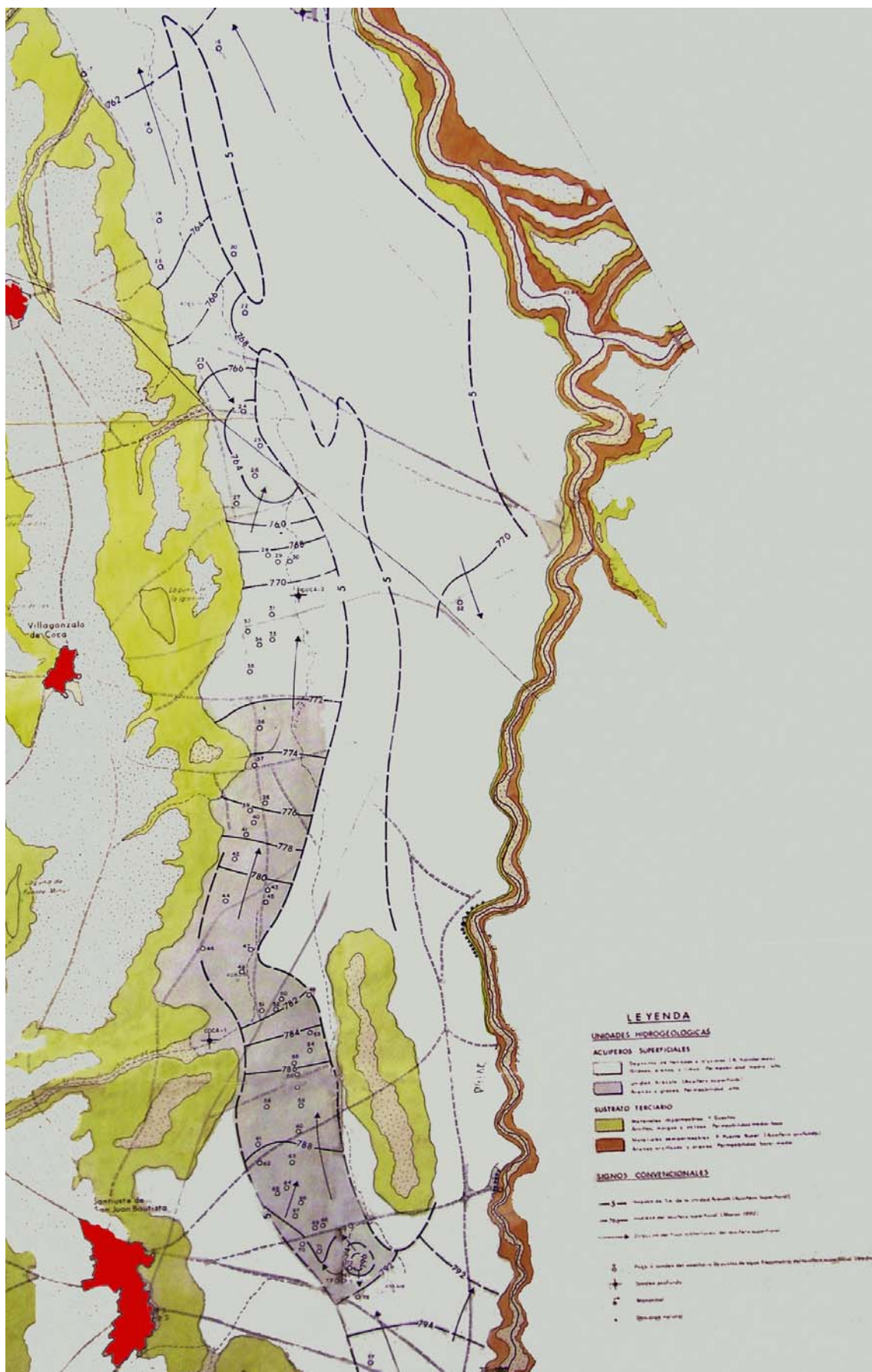


Fig. 2.39. Cartografía hidrogeológica para la situación de 1989. Fuente: IRYDA, 1990.

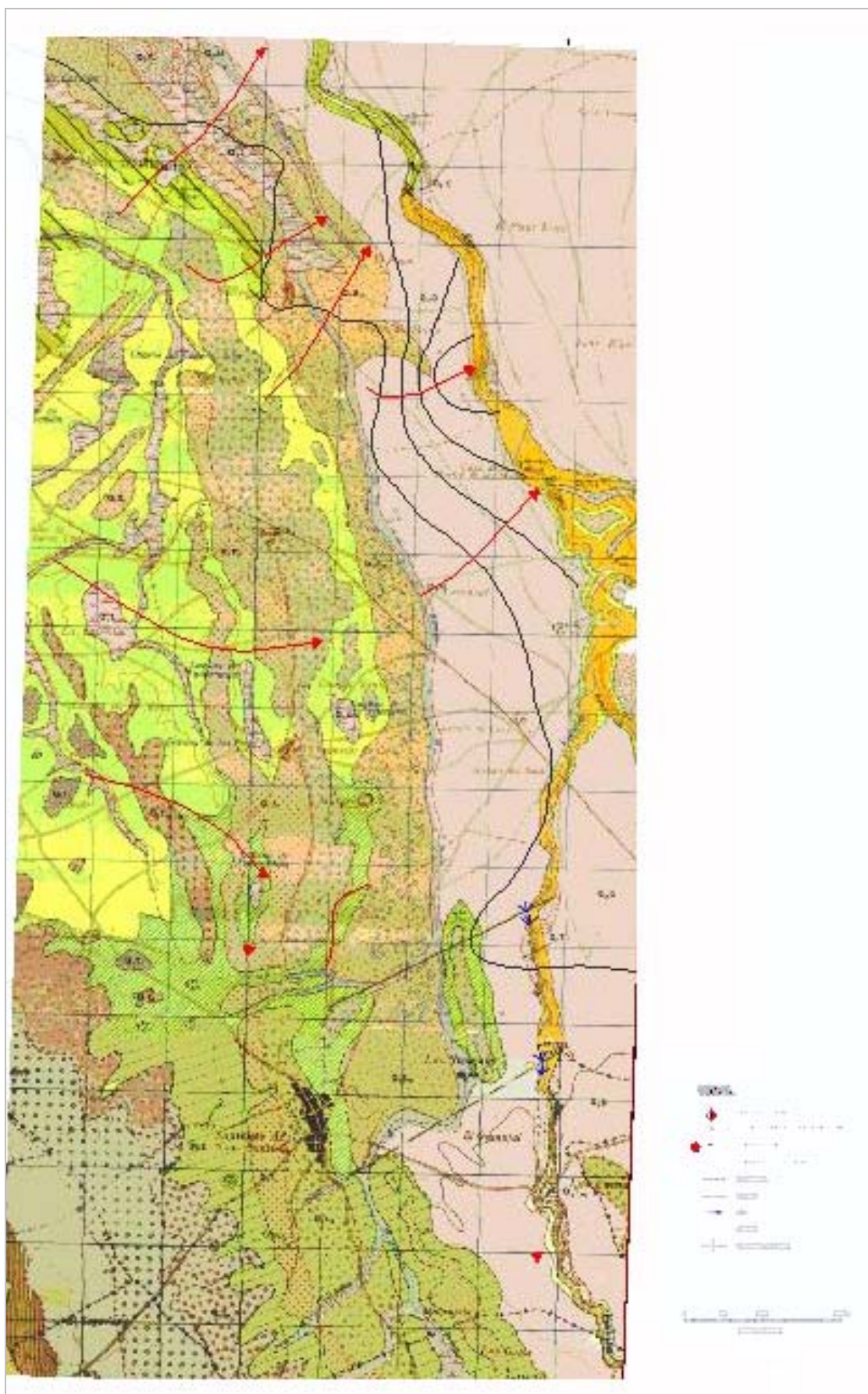


Fig. 2.40. Cartografía hidrogeológica para la situación de agosto de 1999. Modificado de MAPA, 1999.

El trazado de las equipotenciales de la cartografía hidrogeológica realizada por este Ministerio desvela la existencia de numerosas anomalías locales. Muchas de ellas relacionadas con terrazas aluviales, drenes subterráneos, descuelgues desde el acuífero superior hacia el inferior a través de captaciones que intercomunican ambos, y captaciones de profundidad indeterminada con niveles atribuibles a una conexión con el flujo profundo regional.

Las líneas de flujo tienen orientación en general suroeste-noreste, flanqueando los afloramientos terciarios, hacia los cauces fluviales que drenan la *Cubeta*, confirmando la hipótesis efluente de los ríos Voltoya y Eresma y hacia los humedales localizados en la zona norte del área de estudio. En la cartografía de 1999 presentan las mayores variaciones con respecto a la de 1990 en el entorno de la *Cubeta* ubicado al este de Ciruelos de Coca.

Las divisorias de aguas subterráneas apenas han variado de posición a pesar del fuerte descenso del nivel freático, ya que suelen coincidir con contactos litológicos.

Comparando las situaciones piezométricas entre 1990 y 1999 se aprecia un descenso generalizado de niveles en este período.

De las dos cubetas en la piezometría de 1990 (*IRYDA, 1990*), tan sólo hay permanecía en una en 1999 (*en MAPA, 1999a*), que estaba ubicada ligeramente al noreste del casco urbano de Santiuste, y la segunda de las cubetas, al sureste de Ciruelos de Coca, había desaparecido como consecuencia del descenso general del nivel.

Entre 1999 y 2004 ha sido posible estudiar la evolución de las equipotenciales y líneas de flujo gracias a las mediciones periódicas de las redes de control, tanto propias como las realizadas por el MAPA entre 1999 y la actualidad en régimen **afectado o influenciado** (tras el inicio de las operaciones de recarga artificial).

Con los nuevos datos de piezometría obtenidos en las sucesivas medidas, especialmente desde febrero de 2002 hasta febrero de 2004, se han elaborado dos cartografías hidrogeológicas para la situación de septiembre de 2002 (aguas bajas) y febrero de 2003 (aguas altas), de acuerdo con las directrices de la UNESCO de 1970 (*en UNESCO, 1971; Custodio y Llamas, 1983*) y exclusivamente para el acuífero superficial.

El acuífero profundo lleva un comportamiento diferenciado, según se describe en el Apto. 8.3.3, donde figuran cartografías específicas (Figs. 2.43 y 2.44).

Las cartografías cuentan con un grado de detalle mayor que las disponibles en los antecedentes, y presentan las siguientes características:

- Los interpoladores automáticos se han empleado para constatar o revisar la interpretación manual mediante el método de los polígonos de Thiessen.
- La cartografía geológica, de mayor detalle, se ha tenido en cuenta en el trazado de las equipotenciales, con objeto de que no corten afloramientos impermeables y presenten inflexiones en las inmediaciones de los lentejones de grava que funcionan como drenes, donde el acuífero presenta mayor transmisividad.

- Se han tenido en consideración algunos lineamientos que, según se ha deducido en los apartados precedentes, funcionan como drenes en el sistema.
- Se han tenido en cuenta los elementos singulares, tales como humedales relicticos, presencia de sondeos profundos a través de los cuales se descuelga agua desde el acuífero local (medida media de la capa freática en febrero de 2003 de 4,28 m) hacia el acuífero regional (en el que la medida del nivel piezométrico medio es de 55,68 m para la misma fecha), etc.

Un aspecto no considerado en los estudios previos, posible en la actualidad gracias a la excavación del caz de recarga artificial y la perforación de 27 sondeos de investigación entre 1999 y 2003, es la cartografía precisa de afloramientos terciarios o localizados a escasa profundidad (por encima del nivel freático medio en la cubeta, que es de 4,28 m para una situación de *aguas altas*), y de bancos de gravas fluviales de antiguos paleocauces que se detectan en algunos taludes del caz de recarga y de los cauces fluviales principales.

Los afloramientos de margas se localizan en las inmediaciones del Cuerno de la Revilla, junto a la loma de Facies Cuestas. El caz de recarga artificial, al igual que el arroyo de la Ermita, discurren bordeándola y drenando las aguas de escorrentía; por tanto, la infiltración es muy baja en esta zona.

En la zona comprendida entre el Sanchón y el cruce con la carretera de Coca a Villagonzalo de Coca se han detectado margas a escasa profundidad (inferior a 4 m). Aparecen además a una profundidad inferior a 5 m en la zona entre la vía del tren antigua y el cruce con la carretera de Coca a Ciruelos de Coca. En estos tramos se ha constatado una tasa de infiltración de las más bajas del acuífero, debido a la presencia de margas terciarias a escasa profundidad.

Se han detectado, además, afloramientos puntuales en los taludes del caz en la zona de El Puerco, junto al Pinar Nuevo, en la Senda de Carralavega.

En cuanto a los depósitos de gravas aluviales, su distribución aparece concentrada en el sector entre el Sanchón y el puente del tren de alta velocidad, donde se aprecian pequeños niveles de terrazas del arroyo de la Ermita, que afloran en los taludes del caz. El espesor de los niveles de gravas oscila entre 1 y 3 m de profundidad en el trazado del caz de recarga artificial. Estas facies corroboran el carácter fluvio-eólico del medio.

En este período fue controlada la red de control de la piezometría (RCP), con mediciones el 30 de septiembre y el 23 de diciembre de 2002, y el 20 de febrero y el 4 de junio de 2003. Las características de los puntos y datos obtenidos, que figuran en el anexo 2.7.1, han permitido la elaboración de las cartografías hidrogeológicas.

Las cotas Z fueron obtenidas por el procedimiento de GPS estático relativo (*MAPA, 1999a*). Los nuevos puntos presentan una cota correspondiente a su intersección con el MDT de un metro de precisión. La abreviatura N/A se aplica para los datos no disponibles.

Las cartografías hidrogeológicas corresponden a la situación de septiembre de 2002 (aguas bajas) y finales de febrero de 2003 (aguas altas) (Figs. 2.41 y 2.42).

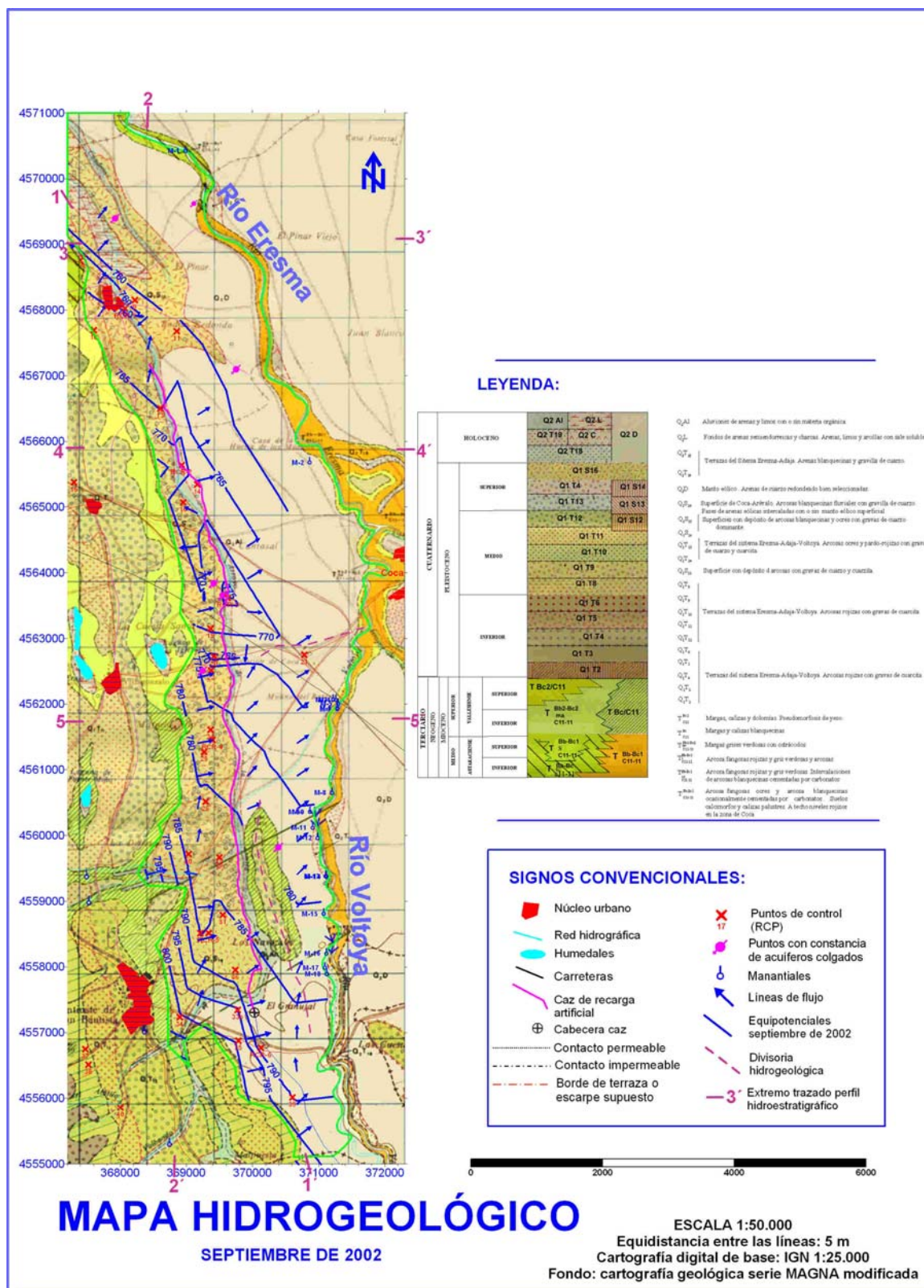


Fig. 2.41. Cartografía hidrogeológica para la situación de septiembre de 2002 (aguas bajas). Escala 1:50.000.



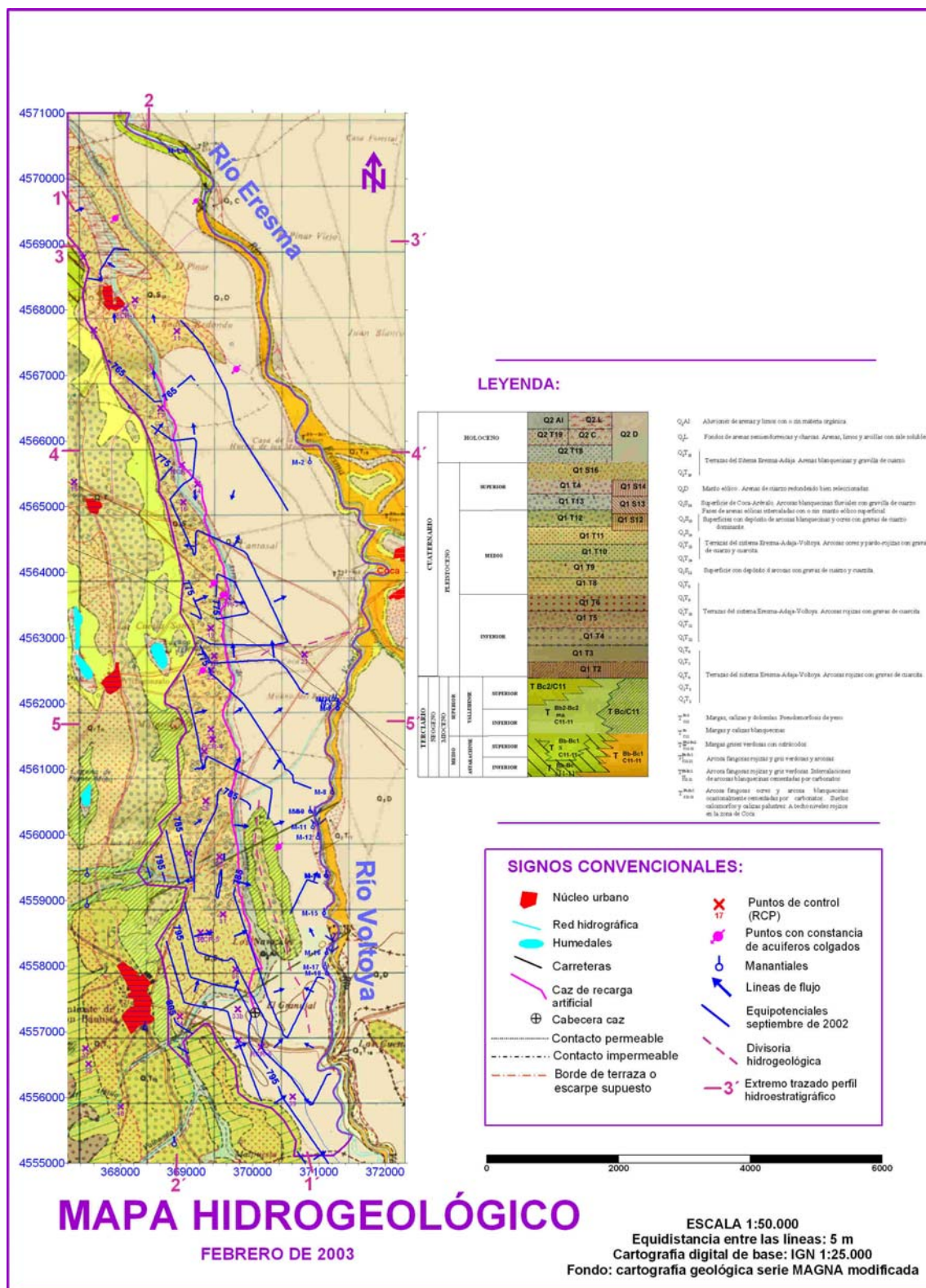


Fig. 2.42. Cartografía hidrogeológica para la situación de febrero de 2003 (aguas altas). Escala 1:50.000.



En estas cartografías quedan definidas las isopiezas, dirección y sentido del flujo, el gradiente hidráulico, la existencia de descargas a cauces superficiales, la posición de los puntos de agua de las redes de control, el trazado del caz de recarga artificial, así como otras características que permiten afinar en la delimitación y la morfología del acuífero superficial, y, por ende, de la *Cubeta*.

Inicialmente se ha empleado un interpolador automático (triangulación) para el cálculo de las equipotenciales, que más tarde ha sido retocado a mano según los criterios ya mencionados, y dibujadas las líneas de flujo. El espaciado de las isopiezas se ha realizado de 5 en 5 metros, lo cual permite reflejar las características de potencial y flujo del movimiento de aguas subterráneas en la cuenca con bastante precisión.

Las cartografías presentan escasas anomalías con respecto a situaciones previas. El sector meridional presenta líneas de flujo de orientación NE-SO, con un gradiente hidráulico cercano al 5 ‰ en la mitad occidental, en septiembre de 2002, que disminuye al 3 ‰ en la mitad oriental (sector este).

Existe una clara divisoria hidrogeológica constituida por un afloramiento de margas (loma del Cuerno de la Revilla). Se trata de un afloramiento longitudinal de dirección norte-sur y casi 2 km de longitud, que separa ambas cubetas. En la zona fosilizada por arenas conserva esta linealidad, apreciándose sondeos cercanos con variaciones significativas de nivel freático durante las operaciones de recarga artificial, al funcionar la divisoria como un umbral.

Al noreste de Santiuste, las isopiezas presentan una inflexión coincidiendo con las anomalías detectadas en las cartografías de 1990 y 1999. Este hecho parece atribuible a una prominencia del paleorrelieve terciario, por un lado, y a la existencia tradicional de captaciones profundas, por otro.

Avanzando hacia el norte se ha detectado otra divisoria hidrogeológica, ligeramente perpendicular a la anterior y coincidente más o menos con el trazado de la carretera de Villagonzalo de Coca a Coca. En este caso se trata de un umbral en el paleorrelieve, por una elevación aparentemente motivada por causas tectónicas (eje de compresión y/o levantamiento del bloque situado más al norte con respecto al meridional).

La zona coincide con el desagüe del sistema fluvial que había encajado en el sector este, actualmente fosilizado, que desembocaba en el río Voltoya a través de la cacera de Betaya.

En la elaboración de cartografías se han empleado interpoladores automáticos para el estudio de la distribución de la variable regionalizada. Con objeto de utilizar el más adecuado para cartografías hidrogeológicas, se han realizado varias pruebas con distintos interpoladores, que se presentan en el próximo apartado.

8.3.2.1. Elección del método de interpolación automática

Entre los distintos interpoladores presentados en el Apto. 4. se ha elegido el de “triangulación por interpolación lineal”, al ser el más usado en la representación de funciones de las que se desconoce su estilo matemático o cuando el número de puntos es relativamente escaso, como se puede considerar a este sistema, con un número de puntos de control como máximo de 54 en una superficie de 41 km² aproximadamente.

De forma experimental se ha llevado a cabo una comprobación con datos reales y objetivos conocidos. Se han aplicado los tres interpoladores especificados al MDT de un metro de precisión, y obtenido el punto de corte del grid generado con la posición de los puntos de agua de la red de control. La disponibilidad de cotas de una precisión centimétrica en algunos puntos de agua (MAPA, 1999a) ha posibilitado comprobar cuál de los resultados se aproxima más a la realidad en un caso como éste.

En la Tabla 2.10 se muestran los datos de cota altimétrica precisos y los calculados por interpolación del MDT. Los resultados más aproximados se muestran en negrita, marcando más de uno si los resultados son similares.

N PROV	X	Y	Z	ID	KR	TR
RCR2	370124	4556765	800.28	804.325	804.325	804.325
RCR1	370474	4556999	803.82	803.824	803.824	803.824
RCR8	369939	4557765	801.73	801.728	801.728	801.728
RCR10	370115	4558015	799.90	799.895	799.896	799.895
RCR14	369910	4558832	798.80	798.795	798.795	798.795
RCR17	369364	4561611	787.90	787.361	787.361	787.361
RCR19	369495	4563034	783.08	783.084	783.085	783.084
RCR21	369549	4563127	783.38	783.376	783.377	783.376
RCR22	369626	4563622	779.65	781.450	781.450	781.450
RCR25	369166	4565346	773.90	773.630	773.630	773.630
RCR27	368870	4565798	777.67	777.678	777.677	777.677

Tabla 2.10. Resultados para el cálculo de la altitud con diferentes interpoladores frente a la altitud de precisión. Los mejores resultados fueron proporcionados por la triangulación para este tipo de variable, con ligeras diferencias sobre los restantes.

Los resultados más aproximados los proporciona el método de triangulación, con siete cotas; el de kriging tuvo seis, y el de inverso de la distancia, cuatro. A tenor de estos resultados, se ha optado por emplear el método de triangulación para el cálculo de las variables regionalizadas.

8.3.3. Acuífero profundo

Se ha generado una cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en la zona de estudio con los datos de medidas de las siete captaciones profundas conocidas.

La disponibilidad de una cartografía del flujo profundo resulta imprescindible para el estudio de alternativas de recarga artificial en profundidad, principal medida para salvaguardar los regadíos que haya durante los periodos de sequía.

Las principales características y medidas de los sondeos profundos inventariados se presentan en la Tabla 2.11:

RCP-03	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	USO	Litología	C. (μS/cm)	pH	T. ^a agua	T. ^a aire	fecha
RCP-99-05	367924	4569398	766.29	S	220.00	R	DETR	400	9.1	16	34	Jun 99
RCP-03-08	367436	4568801	769.07	P-S	>110	I	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	Jun 99
RCP-03-13	369753	4567100	773.9	S	300.00	C	DETR	520	8.1	20	34	Jun 99
RCP-03-24	369410	4563840	779.9	S	100.00	O-R	DETR	450	9.6	18	36	Jun 99
RCP-03-32	368915	4562067	788.2	S	110.00	R	DETR	412	10	15	28	Jun 99
RCP-03-41	370391	4559822	792.57	S	>100	O	DETR	400	10.2	21	35	Jun 99
RCP-03-43	368631	4559366	797.79	S	389.60	C	DETR	300	10.7	21	40	Jun 99
RCP-99-38	367520	4556512	831.42	S	n/a	C	DETR	300	8	17	34	Jun 99

RCP-03	X	Y	Z	N.E. Jun 99	N.E. Ago 99	N.E. Feb 02	N.E. Jun 02	N.E. Sep 02	N.E. Feb 03	N.E. Oct 03
RCP-99-05	367924	4569398	766.29	n/a	n/a	725.04	718.12	n/a	722.85	n/a
RCP-03-08	367436	4568801	769.07	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	712.89
RCP-03-13	369753	4567100	773.9	724.19	723.24	722.68	722.17	n/a	721.07	717.65
RCP-03-24	369410	4563840	779.9	721.89	721.27	731.7	723.72	725.23	732.8	n/a
RCP-03-32	368915	4562067	788.2	n/a	723.3	735	732.86	n/a	734.68	731.68
RCP-03-41	370391	4559822	792.57	751.57	751.37	750.55	750.77	748.16	750.65	749.93
RCP-03-43	368631	4559366	797.79	731.79	n/a	728.41	728.52	732.19	736.56	734.66
RCP-99-38	367520	4556512	831.42	n/a	735.16	737.64	738.29	736.74	740.54	n/a

Tabla 2.11. Datos disponibles relativos a sondeos profundos en la zona de estudio.

NATURALEZA:

Manantial	M
Sondeo	S
Pozo	P
Charca	CH
Piezómetro	Pi

USOS:

Abastecimiento y Ganadería:	A
Desconocido:	O
Riego:	R
No se usa:	C
Investigación:	I

Con estos datos se han generado dos cartografías hidrogeológicas para la situación de septiembre de 2002 y febrero de 2003, que se presentan en las Figs. 2.43 y 2.44.

Fig. 2.43. Cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Septiembre de 2002 (aguas bajas) (página siguiente).

Fig. 2.44. Cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en laCubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Febrero de 2003 (aguas altas) (página siguiente).





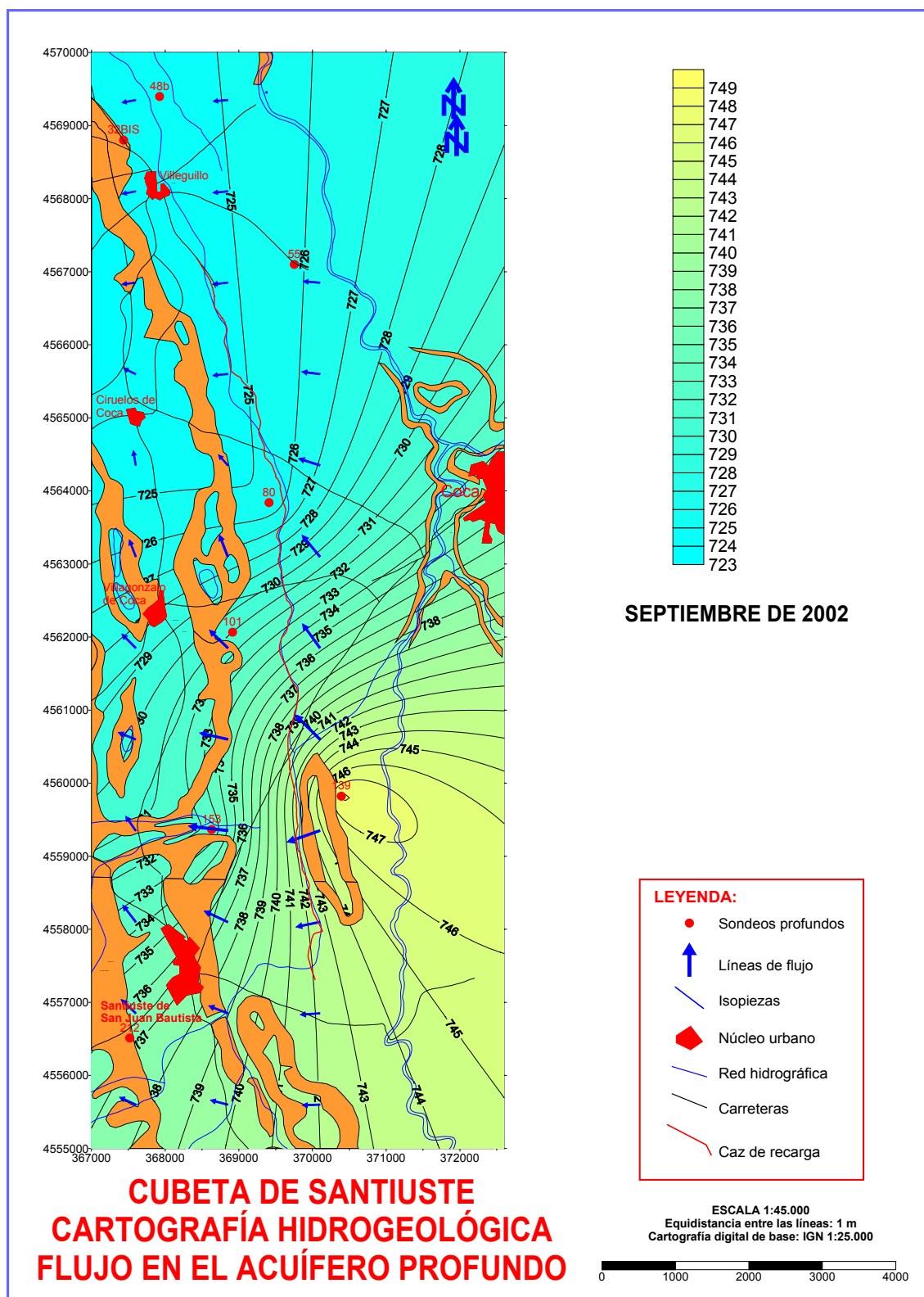


Fig. 2.43. Cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Septiembre de 2002 (aguas bajas).



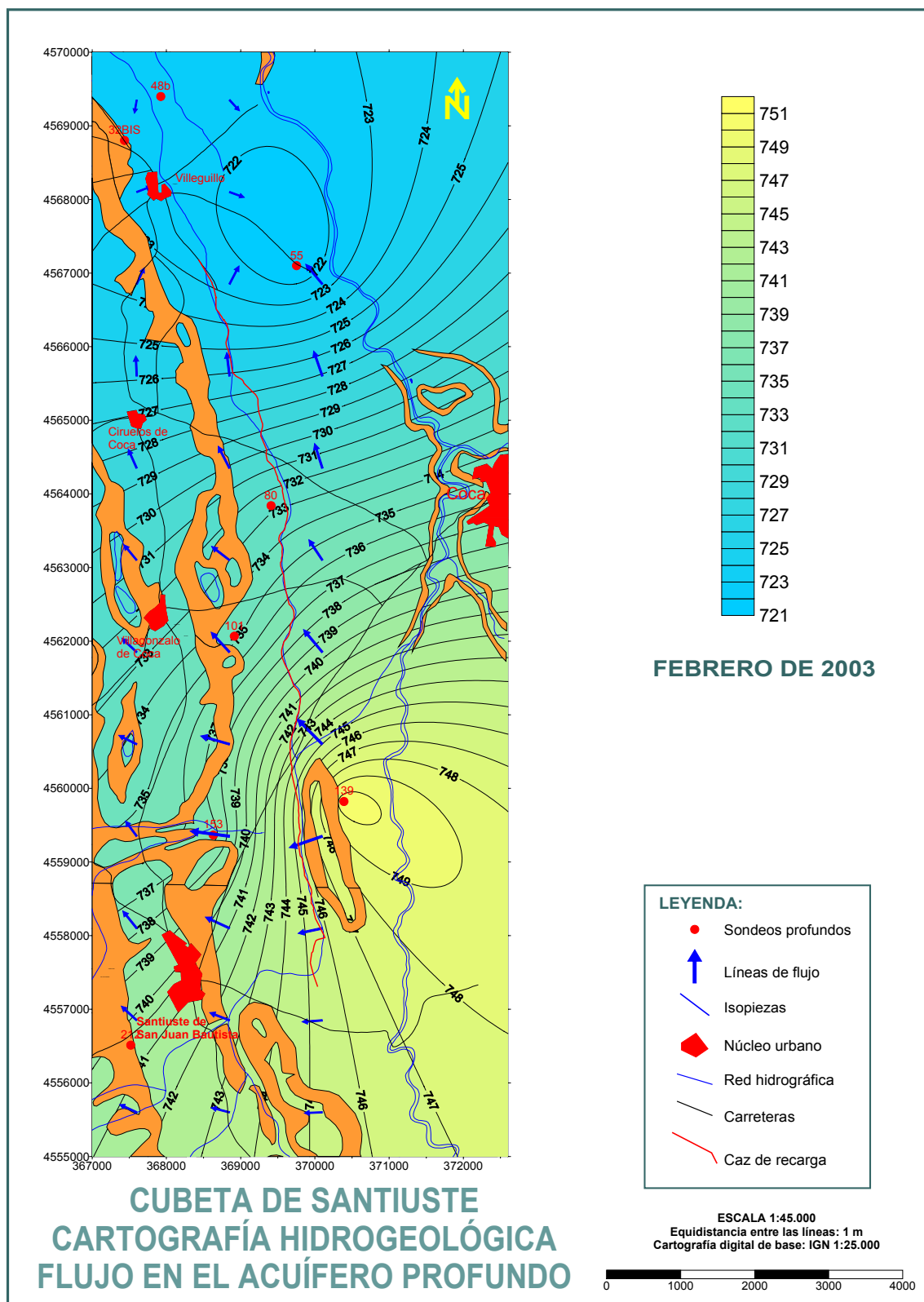


Fig. 2.44. Cartografía hidrogeológica para el acuífero profundo en la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Febrero de 2003 (aguas altas).



El interpolador empleado ha sido el Kriging, con objeto de obtener datos de una zona mayor que la de la *Cubeta* al considerar un acuífero de escala regional.

A pesar de tan baja densidad de información se han detectado importantes rasgos relativos al funcionamiento del acuífero. Observando la cartografía para la situación de aguas bajas, se percibe que las líneas de flujo tienen una orientación NO-SE o NNO-SSE y un gradiente cercano al 2 ‰, lo que coincide fielmente con los datos bibliográficos consultados para el acuífero de Los Arenales (*CHD, 2001* y *MIMAM, 2002*). El rango de variabilidad de los datos oscila entre 723,80 y 748,09 para la situación de septiembre de 2002, lo que representa un intervalo de variación de 24 m. La cota media de la superficie piezométrica es de 732,11 m.

Para la situación de aguas altas, las líneas de flujo presentan orientación NNO-SSE, con un gradiente ligeramente superior y un intervalo de variación de 29,51 m entre las cotas 721,07 y 750,59 m. La cota media de la superficie piezométrica es de 734,52 m en febrero de 2003, es decir, 2,41 m más alta de promedio que al comienzo del año hidrológico.

En la proyección de la zona central de la *Cubeta*, coincidiendo con los sondeos en los que se ha detectado un descuelgue de aguas del acuífero superior hacia el inferior, hay un “domo” en la capa freática profunda, aparentemente motivados por la aportación continua de agua del acuífero superior a través de, al menos, los siete sondeos profundos representados en las cartografías hidrogeológicas previas.

Asociado a este flujo profundo regional, con largos períodos de residencia de agua en el acuífero, se han localizado determinados sectores con líneas de flujo ascendentes donde se han generado yacimientos de minerales salinos y humedales de alta salinidad. Éstos quedan localizados en la margen occidental de la *Cubeta*, y constituyen el denominado “Complejo lagunar de Coca-Olmedo”, de alta salinidad por sistemas de flujo intermedios y profundos (*Rey Benayas, 1991*). Este *Complejo*, dado su carácter medioambiental, es analizado en el Bloque 4, Apto. 5.4. (*Caracterización*).

Con objeto de conocer y evaluar la distribución de las diferencias volumétricas se ha realizado una operación de álgebra de mapas a partir de datos reales, aplicando el método de fluctuación del nivel del agua WTF VA (volumétrico algebraico).

Para ello se ha realizado la sustracción de las reconstrucciones de la capa freática para el acuífero profundo entre las dos situaciones consecutivas de aguas altas (febrero de 2003) y bajas (septiembre de 2002) presentadas. En principio, se aprecia que no toda la superficie piezométrica para la situación de aguas altas queda por encima de la anterior. La zona de máximas diferencias queda localizada en la proyección del sector central de la *Cubeta* y septentrional, mientras que en el extremo meridional se registra un ligero descenso del nivel freático.

La diferencia volumétrica total es de 55.366.904 m³, con un rango de variabilidad entre 721,07 y 750,59 m.

De acuerdo con los valores de los parámetros hidrogeológicos del acuífero profundo, presentados en el Apto. 8.2.3, si consideramos un coeficiente de

almacenamiento del acuífero regional profundo del 2% (MIMAM, 2002), la variación en el almacenamiento bajo la poligonal envolvente de la zona de estudio entre 724 y 748 msnm, es de **1,107 hm³/año**.

De acuerdo con la proyección de los sectores de la zona de estudio sobre el acuífero profundo, las diferencias volumétricas por percolación y descuelgue a través de sondeos penetrativos que intercomunican estos niveles del acuífero multicapa regional ascienden a (Tabla 2.12):

	SECTOR OESTE hm ³ /año	SECTOR ESTE hm ³ /año	TOTAL hm ³ /año
CÁLCULO DARCY	0,45	0,19	0,640
C. DESCUELQUE	0,069	0,053	0,122
TOTAL	0,519	0,243	0,762
ÁLGEBRA MAPAS	0,773	0,334	1,107

Tabla 2.12. Volúmenes percolados hacia el acuífero profundo calculados aplicando distintas metodologías (valores en hm³/año).

La anchura de la horquilla de valores es atribuible a todos los parámetros con alto grado de indeterminación del sistema, destacando los parámetros hidráulicos empleados en los cálculos (obtenidos de la bibliografía), elaboración de cartografías hidrogeológicas con siete puntos de control, etc.

8.4. PERFILES HIDROGEOLÓGICOS

Una vez conocida la **geometría del acuífero** se ha realizado una serie de perfiles con objeto de facilitar la comprensión del sistema.

Para ello se ha reconstruido la geomorfología actual, generando una malla para su tratamiento cartográfico, y restado a las cotas topográficas las de las profundidades de las distintas capas (nivel freático, base del acuífero eólico y base del aluvial infrayacente en algunos puntos (que es similar al techo del terciario con ciertas indefiniciones).

El trazado de los perfiles (dos longitudinales y tres transversales) se presenta en la cartografía hidrogeológica en color granate, con las etiquetas fuera del marco.

Los perfiles hidrogeológicos han sido elaborados a partir de las cotas de intersección con las distintas capas: topografía actual, nivel freático en septiembre de 2002 (aguas bajas, línea rosada), febrero de 2003 (aguas altas, línea roja), quedando el trazado del nivel en la fase preoperacional con trazado negro. La base del acuífero cuaternario mixto arenoso y principalmente eólico se ha trazado con color naranja y la base del acuífero aluvial cuaternario en amarillo. El techo del acuitardo terciario en gris. En estos perfiles se aprecia que el nivel freático presenta ciertas anomalías (variaciones en su gradiente) en las cubetas del paleorrelieve. Este hecho puede ser atribuible al descuelgue hacia niveles inferiores del agua del acuífero superficial a través de perforaciones profundas que intercomunican distintos niveles, a la explotación de sondeos profundos (realizados generalmente con estudios previos y perforados en zonas coincidentes con el depocentro de las cubetas), al régimen influenciado en que se encuentra el acuífero y, actualmente, a las operaciones de recarga artificial.

Los perfiles transversales indican también que la divisoria hidrogeológica longitudinal se prolonga hacia el norte y sur desde la zona donde aflora. En el sector septentrional oriental pierde definición (perfil 1), mientras que en los sectores restantes queda confirmada la presencia de acuíferos conectados hidráulicamente, aunque separados con umbrales topográficos que delimitan pequeñas cubetas.

Observando los perfiles de la capa freática representados para distintas fechas en el anexo 2.5.1, se aprecia que el descenso es más acusado en las cubetas del paleorrelieve, donde se concentran la mayoría de las captaciones. Estas zonas registran el nivel de oscilación máximo entre la situación de aguas altas y aguas bajas, mientras que los tramos de “infiltración inefectiva” presentan oscilaciones menores.

En cuanto al paleorrelieve, se aprecian claramente las divisorias hidrogeológicas cartografiadas. Los perfiles longitudinales presentan un umbral en el centro de la *Cubeta*, que delimita el sector septentrional del meridional. Así mismo, se aprecia una serie de cubetas en cascada o en relevo, que confirman el agreste paleorrelieve del sector a finales del terciario (téngase en cuenta que la escala vertical está muy exagerada).

Para profundizar más en el conocimiento del sistema se han aplicado técnicas hidrogeológicas adicionales relativas al rango de oscilación de la capa freática, relaciones río-acuífero, balance hídrico para el año hidrológico 2002/03, estudio de la respuesta del acuífero ante las operaciones de recarga artificial y elaboración de un modelo analógico.

8.5. RELACIONES RÍO-ACUÍFERO

La circulación y descarga a lo largo de los cauces fluviales ha sido estudiada aplicando tres metodologías diferentes, que permitirán conocer con detalle el comportamiento de los ríos y determinar los tramos efluentes, influentes y conservativos. Estas técnicas son el estudio de la morfología del acuífero y su drenaje natural y el de fuentes y manantiales en los taludes. Como técnica adicional cabe añadir la información del Apto. 8.5.3. (*Aforos secuenciales*). En otro “frente de avance” se han empleado técnicas hidroquímicas para determinar el carácter de ambos ríos (Bloque 3).

8.5.1. Estudio de la morfología del acuífero y su drenaje natural

A partir de la reconstrucción tridimensional del acuífero presentada en el Apto. 6.1, se ha realizado un estudio del contacto entre las Facies Cuestas, de baja permeabilidad, y la Fm Arévalo del acuífero superficial (bien sean facies aluviales o eólicas).

Con la reconstrucción del paleorrelieve se ha realizado la intersección con dos perfiles del acuífero paralelos al cauce de los ríos por su margen izquierda, distantes 100 m, uno para el río Voltoya y otro para el Eresma a su paso por la zona de estudio.

El trazado de estos perfiles, puramente operativos y sin más significado físico que el pretendido, se presenta en la Fig. 2.45.

La intersección entre los segmentos presentados y el acuífero se ha realizado con los programas de cartografía automática *Surfer 8.0*, módulo *Slice* y *Grapher 3*, para la representación georreferenciada de los perfiles calculados. Estos perfiles, designados “perfil paralelo al río Voltoya y Eresma” respectivamente, se presentan en las Figs. 2.46 a) y b) junto con la proyección de los 14 manantiales de la margen izquierda de los ríos.

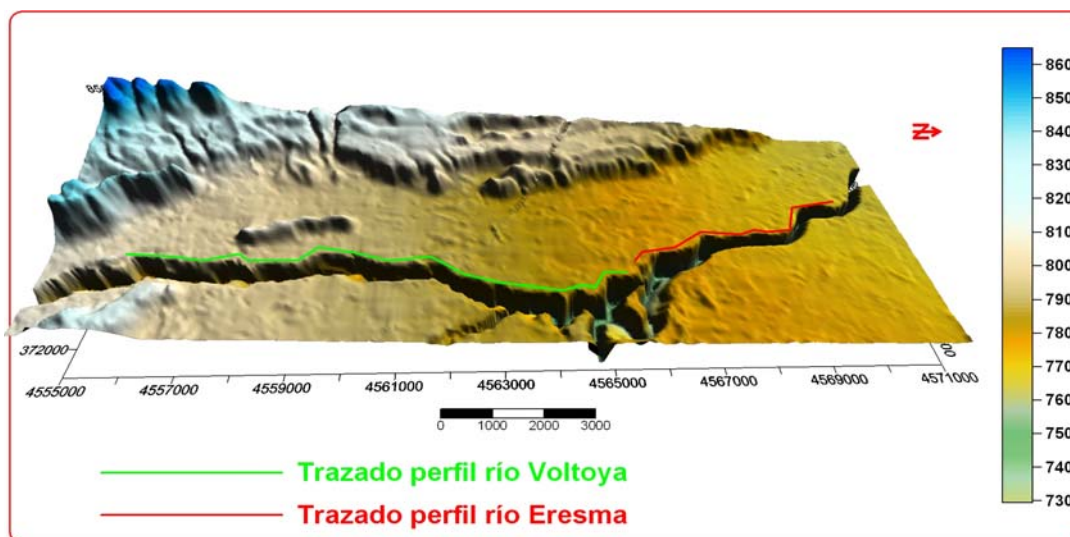
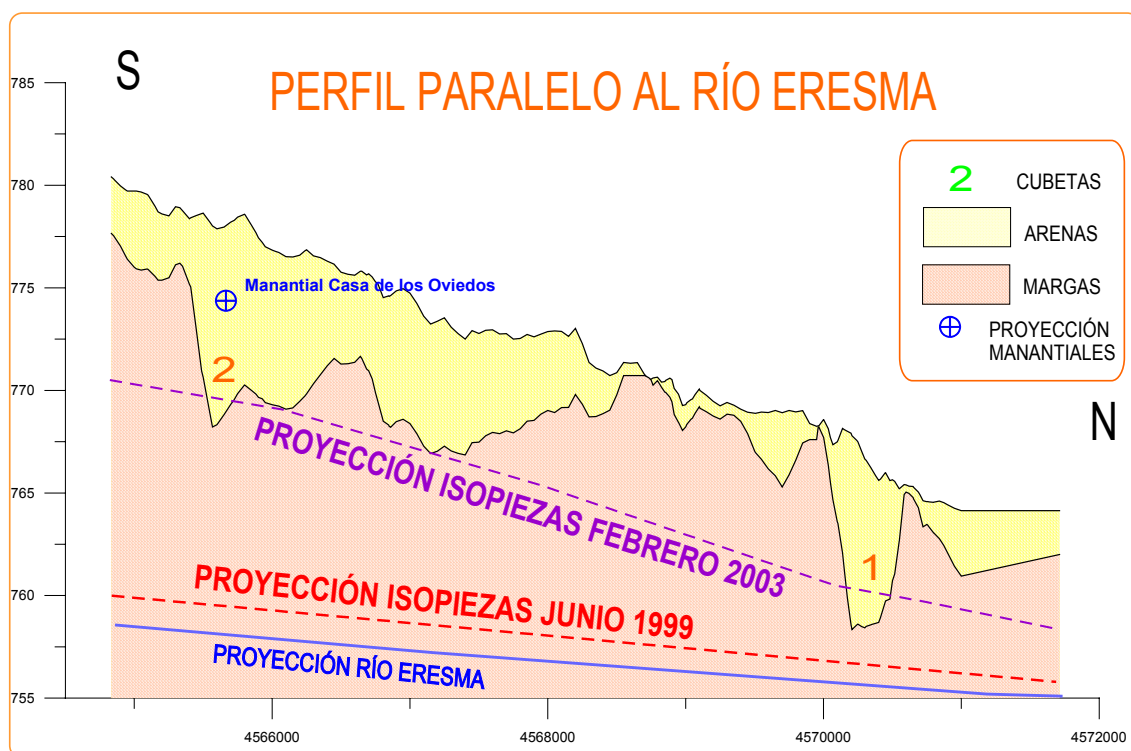
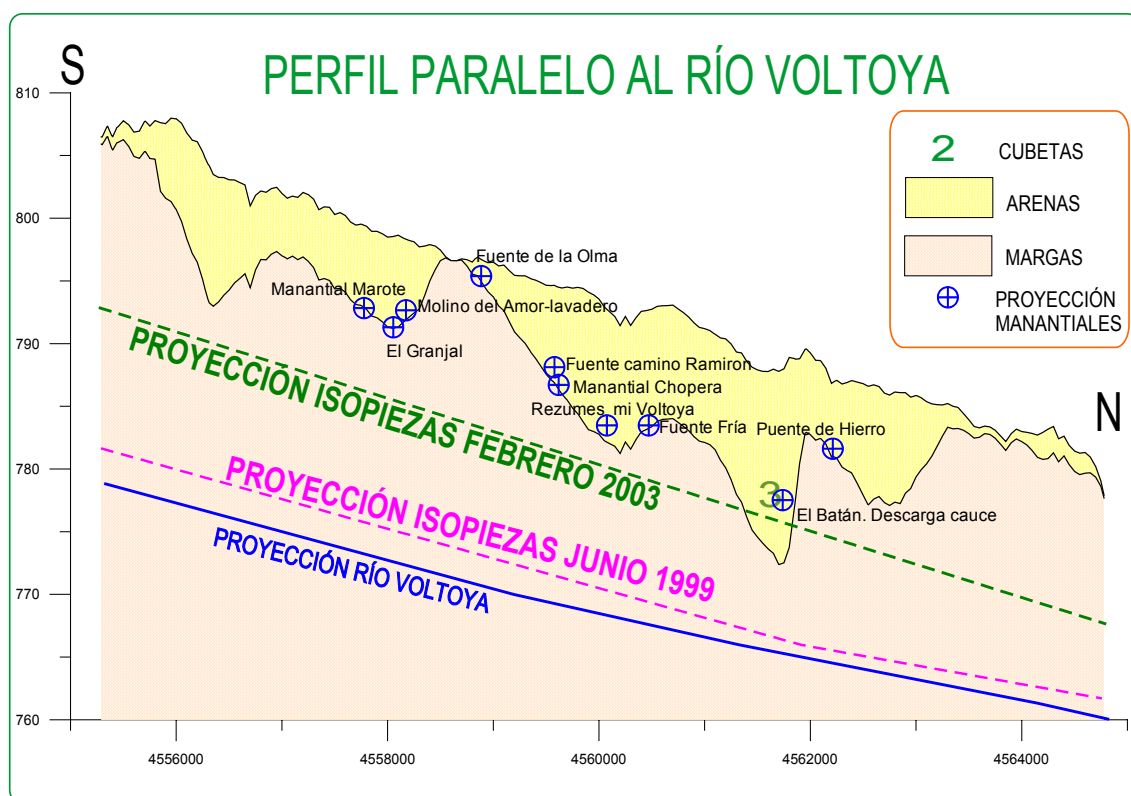


Fig. 2.45. Trazado de los segmentos paralelos a los cauces fluviales en los que se ha dividido la zona de estudio. Posición de los perfiles.



Figs. 2.46 a) y b). Intersección del acuífero con una línea imaginaria paralela 100 m al cauce del río Voltoya y Eresma respectivamente por la margen izquierda (oeste), y proyección de las cotas de los niveles freáticos medidos en el año hidrológico 2002/03 y del cauce del río. Los símbolos gráficos corresponden a la numeración de los manantiales inventariados.

A tenor de estos perfiles, parece demostrado que el funcionamiento de gran parte de los manantiales está relacionado con la topografía de la base del acuífero, de modo que el drenaje de la *Cubeta* se produce a través de los puntos más bajos o “collados” del paleorrelieve. Se han destacado tres collados principales, en los cuales hay sendos manantiales, que son descritos de norte a sur:

El primero, al este de Villeguillo, corresponde al manantial homónimo, cuya zona de drenaje ha sido marcada con un “1” (n.º 13 del inventario de puntos de agua). En la actualidad se ha constatado en campo que este drenaje es un rezume.

El segundo de ellos, cubeta “2”, se encuentra en la proyección de los manantiales de la Casa de los Oviedos, al norte de Coca y en la margen izquierda del río Eresma. Este manantial se encuentra seco en la actualidad, y ha sido localizado gracias a la información de la población local (punto de agua n.º 93 del inventario).

El tercero o cubeta “3” se encuentra en el río Voltoya, en la zona de los manantiales del Batán, junto al antiguo Puente de Hierro y al actual cruce del AVE sobre el río Voltoya. Este sector coincide con la desembocadura de la cacera de Betaya, drenaje natural del caz del acuífero rectilíneo por razones tectónicas. Esta cacera es empleada como aliviadero del caz de recarga artificial (puntos de agua n.º 160 y 161 del inventario).

Existen algunas cubetas secundarias, cuya proyección también es coincidente con collados del paleorrelieve, en los cuales hay emplazados manantiales. Cabe destacar el manantial del Granjal.

Lógicamente, el caudal de los manantiales está condicionado por el nivel de llenado del acuífero.

8.5.1.1. *Drenaje natural por la margen izquierda*

Los perfiles 2.46, elaborados con la intersección de la topografía y una línea semiparalela a los cauces fluviales, demuestra la existencia de una serie de cubetas integradas en el paleorrelieve. A estos perfiles se ha sobrepuesto el perfil de la capa freática calculada a partir del seguimiento de las redes de control del MAPA para la situación de junio de 1999 (período de aguas más bajas de todos los disponibles) y febrero de 2003 (período de máximas históricas en la zona de todas las campañas realizadas).

La proyección muestra un intervalo de oscilación entre el período más húmedo, cuando se produce rebosamiento, y el más seco, en el que la cesión del acuífero a los ríos es muy escasa.

A partir de la proyección de los cauces fluviales en los perfiles se aprecia que los ríos se encuentran por debajo de la cota de drenaje en la mayoría de los casos, en cuyo caso tiene un comportamiento ganador o efluente, o bien conservativo.

Se han detectado tres puntos en los que el nivel de base del río queda por encima del contacto entre las Formaciones Cuestas y Arévalo para la situación de febrero de 2003, período de máxima crecida de todos aquellos con disponibilidad de datos. Se trata de la cubeta 1 para el cauce del río Eresma y las cubetas 2 y 3 en el Voltoya. El perfil

induce a pensar que el drenaje del acuífero se lleva a cabo a través de estas cubetas por rebosamiento, en cuyo caso los collados del paleorrelieve funcionan como drenes.

Al tratarse de un nivel de base máximo histórico no se considera representativo, si bien el acuífero podría tener ocasionalmente y puntualmente un carácter ganador y el río perdedor o influente en estos tres puntos indicados.

El caudal drenado por los cauces fluviales resulta difícil de estimar por procedimientos clásicos, ya que su trazado y configuración dificultan aplicar la ecuación de Darcy. No obstante, se ha realizado una cuantificación darciniana aproximada del caudal de drenaje. La expresión de la ecuación de *Darcy* para la zona saturada es:

$$Q = K \cdot L \cdot e \cdot i$$

Donde:

- Q= caudal (m³/día).
- K= permeabilidad (m/día).
- L= longitud (m).
- e= espesor (m).
- i= gradiente hidráulico (‰).

Esta situación corresponde a un nivel de llenado del acuífero anómalo (tres meses después del primer ciclo de recarga artificial en un año tipo húmedo).

Los datos hidráulicos precisos para el cálculo del volumen transferido son:

- Cota de la toma de agua (punto de transferencia): 814 m.
- Límite del área a modelizar:
- Abcisa UTM 367.000 hasta la abcisa UTM 37.2000.
- Ordenada UTM 4.555.000 hasta la ordenada UTM 4.560.000.
- Cota máxima Voltoya: 794,1 m (deducida del MDT).
- Diferencia de elevación: 63,4 m.
- Cota mínima río Eresma: 730,7 m (deducida del MDT).
- Longitud perfil 1: 9.785 m.
- Longitud perfil 2: 8.294 m.
- Longitud total perfiles: 18.079 m.
- Gradiente = $63,4/18.079 = 0,35 \%$.

El gradiente hidráulico medio entre las equipotenciales en el sentido de las líneas de flujo representadas en la cartografía hidrogeológica es de 0,035 ‰.

- Cubeta 1: $5/1514 = 0,003 \%$.
- Cubeta 2: $5/747 = 0,0067 \%$.
- Cubeta 3: $5/824 = 0,0061 \%$.



El área es la correspondiente a las tres cubetas en las que se ha detectado un drenaje directo. Esta ha sido cubicada en el perfil escalado mediante la aplicación Auto Cad 2000, resultando:

- Cubeta 1: 8.061 m².
- Cubeta 2: 4.008 m².
- Cubeta 3: 9.980 m².

El valor de permeabilidad horizontal (K_h) media inicialmente adoptado para el acuífero arenoso superficial corresponde a datos bibliográficos de una experiencia de recarga artificial en el sector meridional oriental de la *Cubeta* (MOPTMA-SGOP, 1994), valor que resulta sobredimensionado para la mayoría de las zonas restantes.

- Kh arenas eólicas (Fm. Arévalo): 25 m/día
- K facies detríticas de la Fm. Cuestas: 0,00005 m/día

La permeabilidad considerada ha sido la extraída de la cartografía de distribución de permeabilidades.

- Cubeta 1: 25 m/día.
- Cubeta 2: 25 m/día
- Cubeta 3: 15 m/día.

El resultado de los cálculos queda como sigue:

Volumen transferido desde la cubeta a los cauces fluviales en la situación hidráulica de febrero de 2003 (año húmedo).

$$Q = A_1 K_1 i_1 + A_2 K_2 i_2 + A_3 K_3 i_3 \gg \gg$$

$$\gg \gg Q = 8061 \cdot 25 \cdot 0,003 + 4008 \cdot 25 \cdot 0,0067 + 9980 \cdot 15 \cdot 0,0031 =$$

$$= 1.740 \text{ m}^3/\text{día} = 0,636 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El resultado preliminar es de **464 m³/día** drenados del acuífero por el río Voltoya para una situación de “aguas altas”, que bien puede estar inducida por la recarga artificial, y **1.276 m³/día** para el Eresma en una situación análoga (2,75 veces más alta). Se trata del drenaje de la componente subterránea, sin considerar la escorrentía superficial, y para una situación de máxima recarga (año húmedo tras el inicio del primer ciclo de recarga artificial). De este modo, este valor puede ser considerado como el drenaje máximo, o casi, de la *Cubeta* a través de las facies de la Unidad Arévalo hacia los cauces fluviales Voltoya y Eresma.

El hecho de suponer que parte del drenaje del acuífero se produce a través de estas cubetas, conlleva la realización de un inventario de fuentes y manantiales en los taludes que confirmen o rechacen esta hipótesis.

8.5.1.2. Drenaje natural por la margen derecha

En cuanto a la margen derecha de los ríos Voltoya y Eresma, se ha constatado que una fracción importante de la zona de estudio está compuesta por materiales terciarios en los que ha habido depósito de arenas eólicas sobre paleoformas cóncavas. Estos pequeños acuíferos son básicamente de regulación y están constituidos por arenas eólicas dunares de grano fino, arcillas y arenas de llanura de inundación (Formación Arévalo), con un espesor medio inferior a 5 m. Debido a su entidad, en la mayoría de los casos no han sido representados en la cartografía geológica de la serie MAGNA a escala 1:50.000. El uso del suelo en la margen derecha es eminentemente forestal, mientras que en la izquierda es principalmente agrario.

La descarga se produce por acuíferos locales de escaso desarrollo y continuidad, a favor de los paleorreliieves terciarios. Del mismo modo se ha apreciado una cierta abundancia de rezumes en la margen derecha de ambos ríos, que en la época lluviosa representan una descarga casi continua, aunque la aportación sea muy inferior a la de la margen izquierda.

En el apartado siguiente se estudian con mayor grado de detalle los manantiales de la zona de estudio inicialmente descritos en el Apto. 8.1. (*Inventario*).

8.5.2. Estudio de fuentes y manantiales en los taludes

Se ha realizado un inventario de manantiales en las márgenes de los ríos con objeto de ver los puntos preferentes de descarga del acuífero en régimen natural y afectado. Se ha localizado un total de 19 rezumes y manantiales en ambas márgenes, contando para ello con colaboradores locales, puesto que muchos manantiales “históricos” se encontraban secos en la actualidad. Su importancia es capital, ya que son indicadores del funcionamiento del acuífero y de su geometría profunda.

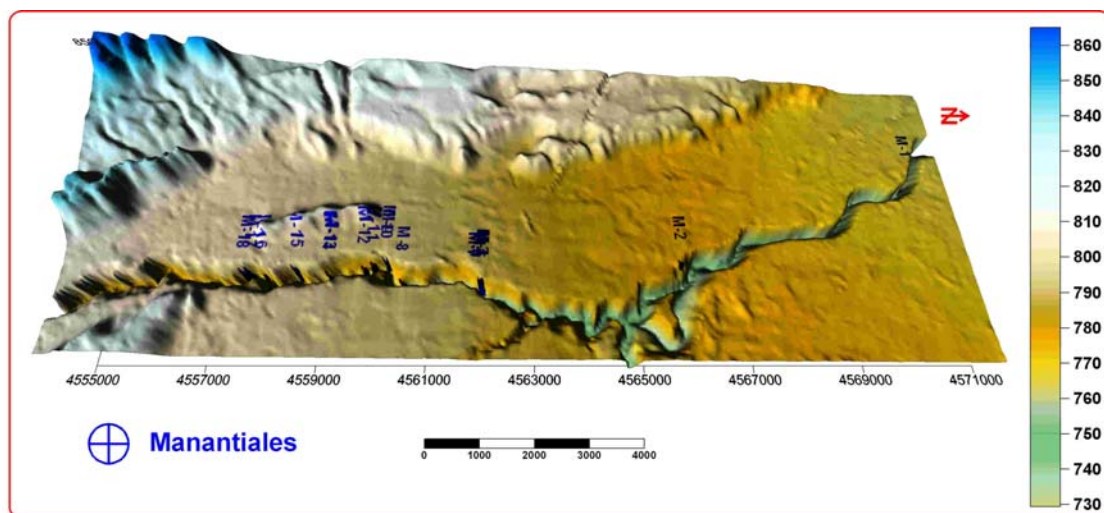
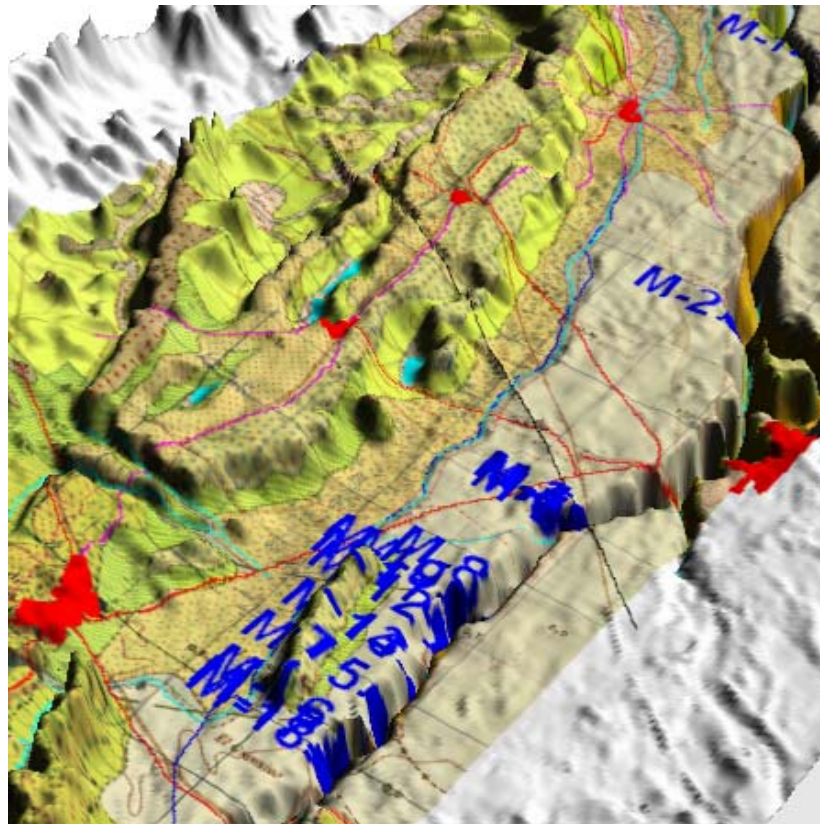
La mayor parte se concentran en el extremo sur de la *Cubeta*, instalados sobre tramos donde el río meandrifica hacia el noreste. De ellos varios drenan al ramal derecho, mientras que las aguas subterráneas del ramal izquierdo se dirigen hacia el noreste, hacia la zona de descarga principal del acuífero superficial. El afloramiento de materiales terciarios que disecciona ambos ramales aparece sombreado en las Figs. 2.48 a) y b) junto con la distribución de las fuentes.

En las inmediaciones del puente del tren de alta velocidad se concentran varios manantiales de agua cárdena, coincidiendo con un tramo en el que el río Voltoya tiene una fuerte inflexión hacia el noreste (en la proyección de la coordenada Y=4.582.000).

El río Eresma presenta dos manantiales de importancia entre su confluencia con el Voltoya y el límite septentrional de la zona de estudio, el de la Casa de los Oviedos y el de Villeguillo. Ambos se encuentran secos en la actualidad.

Entre ambos se aprecian rezumes puntuales en el contacto terciario-cuaternario de las laderas del cauce, en la zona en la que el cauce va encajado sobre el sustrato terciario. Puntualmente cabe esperar que haya manantiales sumergidos.

De acuerdo con la información disponible, el caudal drenado a través de los manantiales inventariados para la situación de agosto de 2003 (aguas bajas) oscila en torno a 1,3 l/s ($\approx 112 \text{ m}^3/\text{día}$) para la margen izquierda.



Figs. 2.47 y 2.48. Detalle de la localización de los manantiales inventariados sobre un bloque diagrama al que se ha añadido la cartografía geológica y un bloque digrama en otra perspectiva.

En las Figs. 2.47 y 2.48 se presenta una proyección de la localización de los manantiales sobre los perfiles realizados paralelos al cauce de los ríos. De este modo, ciertos manantiales parecen funcionar drenando al acuífero, mientras que otros drenan el ramal derecho de la *Cubeta* o bien pequeñas terrazas colgadas.

En el río Eresma, los dos manantiales detectados se encuentran secos en la actualidad, el del pinar de Villeguillo y el manantial de la Casa de los Oviedos. Ambos funcionan drenando al acuífero de acuerdo con los perfiles realizados y su funcionamiento.

En el río Voltoya el drenaje parece producirse por los manantiales del Batán, Puente de Hierro (n^{os} 3 a 7), Fuente Fría (M-9) y drenajes de la margen izquierda (M-11 y M-12). En la zona del Puente de Hierro desemboca además el principal drenaje de aguas superficiales de la *Cubeta*, a través de la cacería de Betaya. Los restantes manantiales corresponden a descargas puntuales del ramal derecho de la *Cubeta* o a formaciones aluviales que han quedado colgadas.

A la vista del funcionamiento de los manantiales, este caudal quedaría incluido en el caudal drenado desde la *Cubeta* hacia los cursos fluviales drenantes, si bien el drenaje podría producirse a través de lineamientos que funcionan como drenes.

En **síntesis**, cabe destacar que las observaciones efectuadas apuntan a que el río Voltoya funciona como una red de drenaje o vaciado del acuífero superior en ambos márgenes, al haberse constatado aportaciones directas al cauce a través de zonas de mayor permeabilidad que funcionan como drenes, y también a lo largo de los taludes mediante descargas difusas desde las terrazas de los ríos, desde el contacto arenas-margas que queda en ambos márgenes o en el lecho tras su encajamiento o manantiales. En el río Eresma, el hecho es similar y más claro, al existir más afloramientos de Facies Cuestas y mayor escasez de gravas en el lecho del río.

Algunos aspectos que defienden esta hipótesis son los afloramientos puntuales de estas facies a lo largo del cauce, tales como en el antiguo lavadero de Santiuste de San Juan Bautista, en los Prados del Amor; en los taludes del Puente Chico sobre el río y del arroyo Balisa, cerca del núcleo urbano de Coca; taludes en el Molino del Batán, etc. en el río Voltoya; así como los taludes de la margen izquierda del río Eresma, entre Coca y Villeguillo, en la Casa de los Oviedos, cercanías de la estación Saica de Villeguillo, etc.

Todos los topónimos figuran en los mapas topográficos a escala 1:25.000 del IGN, presentados como mapa de base en las Figs. 428-II, 428-IV y 455-II de la versión digital del presente trabajo y en la Fig. 2.52.

De cara a las operaciones de recarga artificial (AR), cabe destacar su alta dependencia con los períodos climáticos húmedos. Es previsible que durante las sequías históricas no sea viable la realización de estas operaciones, ya que la concesión otorgada por la CHD a la comunidad de regantes demandante se revisa anualmente. De este modo, se vislumbra un problema futuro: ¿Cómo podrán regar los agricultores en períodos de sequía si el acuífero tiene una inercia baja y sus recursos renovables son movilizados anualmente, quedando un almacenamiento bastante reducido para las necesidades actuales?. Esta cuestión suscita la necesidad de contar con otro tipo de alternativas de recarga artificial y tipologías de almacenamiento profundo, cuya viabilidad se estudia en el Bloque 5.

9. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO SUPERFICIAL

En este apartado se plantea y resuelve un estudio de las aportaciones y cierre de un balance hídrico para el año hidrológico 2002/03.

En la revisión de los antecedentes consta que se han realizado varios balances hídricos en la zona de estudio. En la década de los 90, los recursos eran explotados a un ritmo superior a la recarga, lo que llevó a las autoridades competentes a declarar provisionalmente sobreexplotado el acuífero. Prueba de ello era el descenso acumulado de niveles y la existencia de un descenso residual no recuperable, lo que representaba un déficit entre 0,7 y 4 hm³/año (IRYDA, 1990; MAPA, 1999a).

Los cambios introducidos en el sistema en el siglo XXI (principalmente el abastecimiento desde el exterior de la *Cubeta* para evitar las altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas y la mejora en la eficiencia del riego) han contribuido a minimizar el déficit hídrico, según las encuestas realizadas a los ayuntamientos de las tres localidades de la zona de estudio, para el año natural 2002.

A estos cambios hay que añadir la implantación de un sistema para el abastecimiento público de las localidades a partir de las aguas del río Eresma mediante un sistema de RBF (Fig. 2.49). Para ello fue excavado un pozo de tipo *Ranney*, con drenes radiales bajo el río Eresma. Las aguas, una vez captadas, son dirigidas a una planta de tratamiento en la localidad de Íscar, donde son depuradas químicamente, minimizando su contenido en arsénico y en otros compuestos nocivos para la salud.



Fig. 2.49. Pozo Ranney de captación de aguas del río Eresma mediante un sistema tipo RBF. Las aguas alumbradas son dirigidas a una planta de tratamiento y potabilización en Íscar, localidad adyacente a Villeguillo por el este.

Además de los cambios antrópicos, cabe añadir, como factor más importante para el balance hídrico actualizado, la presencia de un período húmedo de altas precipitaciones, de modo que la precipitación total del año hidrológico 2002/03 llegó a superar la precipitación máxima acumulada de los últimos 50 años.

En contraposición, como detracciones adicionales, cabe mencionar que se han perforado nuevas captaciones profundas que, previsiblemente, descuelgan un volumen de agua desde el acuífero superior hacia el profundo o regional, incrementando la cifra de caudal transferido respecto a los balances hídricos de *IRYDA, 1990* y *MAPA, 1999a*.

De las tres localidades estudiadas, tan sólo Coca tiene EDAR, mientras que Santiuste de San Juan Bautista y Villeguillo prevén su inminente construcción. De este modo, hay unos retornos al sistema en forma de aguas residuales que inicialmente procedían del exterior.

La actualización del balance hídrico para el año hidrológico 2002/03, primer ciclo de recarga artificial, persigue los siguientes objetivos:

- Contar con criterios técnicos para evaluar la variación del volumen de agua almacenado en el acuífero.
- Disociar la fracción de agua que corresponde a infiltración directa del agua de lluvia y la procedente de las operaciones de recarga artificial.
- Elaborar un nuevo balance que permita obtener datos cuantitativos acerca del beneficio que las operaciones de AR producen en la zona.

El apartado se ha estructurado en los siguientes puntos:

- Fundamentos del balance hídrico.
- Revisión de los balances hídricos preexistentes para las situaciones de 1990 y 1999.
- Evaluación de los componentes del balance hídrico
- Cierre del balance hídrico en la cubeta de Santiuste y sectorización

Finalmente, cabe calcular el volumen de agua infiltrado en el terreno durante el primer ciclo de AR, tarea llevada a cabo en el Apto. 10.2.

9.1. FUNDAMENTOS DEL BALANCE HÍDRICO

Esta sección se presenta a modo de introducción teórica de los aspectos relativos a la elaboración de un balance hídrico en una zona determinada.

La formulación originaria del balance es:

$$E - S = \Delta V \pm \varepsilon$$



Donde:

- E: Entradas.
- S: Salidas.
- ΔV : Variación del almacenamiento.
- ε : Error de cierre.

El establecimiento de un balance supone medir flujos de agua (caudales) y almacenamientos (niveles). El problema se complica cuando hay flujo o transferencias de volumen a través de divisorias o límites del acuífero, como es el caso.

Las posibles entradas de un acuífero en régimen de explotación pueden ser debidas a numerosas causas, como la recarga de lluvia o retornos de riegos, entradas por cauces, a través del contacto con otras formaciones geológicas, etc.

Las salidas por extracciones, por manantiales, rezumes, descargas a ríos y transferencias hacia otros acuíferos lateralmente o en la vertical, bien sea por descuelgue a través de sondeos o bien por goteo desde el acuífero superficial al profundo a través de las Facies Cuestas.

Dependiendo de los términos que intervienen, resulta la ecuación:

$$P + Q_{se} + Q_{pe} - ETR - Q_{ss} - Q_{ps} (+/- \Delta V) = \varepsilon$$

Donde:

- Aportación pluviométrica: P.
- Caudal superficial entrante: Q_{se} .
- Caudal subterráneo entrante: Q_{pe} .
- Evapotranspiración real: ETR.
- Caudal superficial saliente: Q_{ss} .
- Caudal subterráneo saliente: Q_{ps} .
- Variación del almacenamiento ΔV (diferencia entre el volumen inicial y final considerando la reserva en el acuífero, suelo, zona saturada, cauces, etc.).

Puesto que la evaluación de los componentes de un balance presenta siempre ciertas dificultades, se han minimizado las incertidumbres reduciendo el intervalo temporal al año hidrológico 2002/03, lo que cuenta con la ventaja de disponer de una adecuada caracterización hidrogeológica, hidrodinámica e hidroquímica del sistema.

9.2. BALANCES HÍDRICOS PREEXISTENTES PARA LAS SITUACIONES DE 1990 Y 1999

9.2.1. Resumen del balance hídrico del IRYDA, 1990

El resultado de aplicar la ecuación del balance en el ámbito de la Cubeta de Santiuste se presenta en la Tabla 2.13.

A la vista de las entradas del balance, se estimaban unos recursos en el acuífero superficial de 5,2 hm³/año, de los que 4,1 hm³/año (80%) correspondían al acuífero oeste, y 1,1 hm³/año (20 %) al este.



TÉRMINO BALANCE	CONCEPTO	Acuífero ⁴ Oeste	Acuífero Este	Total hm ³ /año
ENTRADAS	Infiltración directa del agua de lluvia (descartada la ETR).	1	1,1	2,1
	Infiltración a través de la escorrentía superficial	2,8	0	2,8
RECARGAS	Flujo subsuperficial indirecto	0,3	0	0,3
TOTAL		4,1	1,1	5,2
SALIDAS	Salidas por bombeo:	3,5	0,1	3,6
DESCARGAS	Percolación hacia el acuífero profundo.	0,7	0,6	1,3
	Descarga natural	0	0,2	0,2
	Drenaje subsuperficial y subterráneo hacia el norte de Villeguillo	0,2	0,2	0,4
TOTAL		4,4	1,1	5,5

Tabla 2.13. Tabla resumen del balance hídrico en el acuífero superficial de la Cubeta en 1990. (Modificado de IRYDA, 1990). Unidades en hm³/año.

Las reservas en 1990, considerando un coeficiente de almacenamiento de 0,15, fueron estimadas en unos 12,9 hm³, de los que 5,6 hm³ (43%) correspondían al acuífero oeste y 7,3 (57%) al acuífero este.

Se destacaba que los recursos renovables del acuífero suponían el 40% de las reservas totales del mismo, relación que para el acuífero oeste, en particular, suponía el 73%. Esta circunstancia ponía de manifiesto la “fragilidad” de la explotación de este acuífero al depender en exceso de los recursos renovables, que en este caso equivale a decir “de la climatología”.

La demanda de agua correspondía entonces casi exclusivamente a la agrícola, sector que estaba en plena recesión en esa década por los limitados recursos de agua subterránea de la zona. Esta cifra se estimaba en unos 3,6 hm³/año para el acuífero superficial en 1990, que prácticamente correspondían al “acuífero oeste” en su totalidad, volumen equivalente a casi el 90% de sus recursos renovables.

9.2.2. Resumen del balance hídrico del MAPA (1999)

El balance fue realizado para un ámbito territorial similar al anterior, la Cubeta de Santiuste. En él sólo fueron desglosados algunos de los componentes para el acuífero, sector o ramal este, cuya entidad era tan baja comparativamente que fueron considerados de manera conjunta a efectos operativos finales.

Los resultados de este balance se resumen en la Tabla 2.14.

⁴ Los acuíferos este y oeste son designados en los antecedentes mencionados “ramales” este y oeste.

ENTRADAS	Infiltración directa del agua de lluvia	1,35 hm³/año
	Infiltración a través de la escorrentía superficial	1,77 hm³/año
RECARGAS	flujo subsuperficial indirecto procedente de los depósitos de terrazas y de los aluviales	0,22 hm³/año
TOTAL		3,34 hm³/año
SALIDAS	Salidas por bombeo:	
	- Uso consuntivo	1,764 hm³/año
	- Abastecimiento urbano e industrial	0,411 hm³/año
	Salidas por cauces superficiales.	0
	Percolación hacia el acuífero profundo.	1,3 hm³/año
	Descargas Manantiales y rezumes	0,2 hm³/año
DESCARGAS	Drenaje subsuperficial y subterráneo hacia el norte de la <i>Cubeta</i>	0,4 hm³/año
TOTAL		4,075 hm³/año
TOTAL BALANCE		-0,735 hm³/año

Tabla 2.14. Tabla resumen del balance hídrico en el acuífero superficial de la Cubeta en 1999. (Modificado de MAPA, 1999a). Unidades en hm³/año.

Según este balance, realizado tras un período de sequía relativamente fuerte que venía acompañado de un ligero incremento en las extracciones, el acuífero era claramente deficitario a aquél ritmo de extracción de aguas subterráneas. El déficit anual para el año tipo medio fue calculado en 0,73 hm³/año, volumen sustancialmente superior al estimado por el IRYDA para la situación de 1989, que era de 0,3 hm³/año, todos ellos en el sector oeste del acuífero (o ramal oeste según la terminología empleada en la reseña).

Con respecto al balance de 1990, fue evaluada una fracción de agua resultante de la infiltración a través del lecho de los ríos. Además habían sido perforadas nuevas captaciones que intercomunicaban los acuíferos superficial y profundo, por lo que el caudal de “descuelgue” debía ser superior en 1999. El ligero incremento en las cifras de abastecimiento urbano e industrial son atribuibles a la perforación de nuevos pozos de abastecimiento por parte de empresarios, evitando su conexión a la red de abastecimiento municipal.

En general, el aumento en el déficit es atribuible a la concurrencia de un período de sequía acumulado junto con un incremento en las extracciones para riego.

9.3. BALANCE HÍDRICO SECTORIZADO DE LA ZONA DE ESTUDIO

9.3.1. Evaluación de los componentes del balance hídrico

Geográficamente se han diferenciado dos sectores en la *Cubeta*, separados por la divisoria de aguas subterráneas principal, que la disecciona en dirección norte-sur.

El período empleado para la determinación del balance ha sido el ciclo correspondiente al inicio de las operaciones de AR, es decir, al **año hidrológico 2002/03**.



Los resultados del cálculo contribuirán a calcular el volumen de agua infiltrado como consecuencia de las labores de AR para el primer ciclo de recarga artificial (Aptdo. 10.2).

Operativamente, los términos han sido desglosados en entradas (o recarga) y salidas (o descarga). Se han diferenciado los componentes siguientes:

9.3.1.1. Entradas. Año hidrológico 2002/03

- **Infiltración directa de la lluvia.** Se ha cuantificado por tres metodologías:
 - En la primera se ha estimado un porcentaje medio del 75% de la lluvia útil (*IRYDA, 1990*). De este modo, si se considera válido este porcentaje y se aplica al resultado de los datos climáticos del período de estudio (año hidrológico 2003/03), el valor medio de lluvia útil para la zona sería de 44,39 l/m² en el período de referencia. Este valor, presumiblemente, podría ser parecido al año hidrológico 2002/03 del balance actual.
 - Aplicando el método de Thornthwaite el resultado medio es de 39,5 l/m² anuales (por el método directo) para el período comprendido entre 1999 y 2003.
 - De acuerdo con los resultados del modelo de precipitación-aportaciones HELP, el resultado es 50,47 mm de infiltración para el período 1999-2002 (*MAPA, 2003*). Este volumen resulta sobredimensionado con respecto al período de referencia, por tanto, estos datos deben ser considerados con suma cautela.

De los tres procedimientos de cálculo, el primero es el más cercano al valor medio (44,78 mm), por tanto, será el empleado a efectos de cálculos. Los resultados por el método de Thornthwaite aparentemente están subdimensionados, mientras que por el modelo HELP podrían estar sobreestimados.

El cálculo de la cantidad de agua infiltrada requiere determinar previamente la superficie de infiltración efectiva, que es menor que la de afloramientos permeables. Para ello se ha planimetrado la superficie de los sectores o ramales, excluyendo los afloramientos de margas terciarias de dos maneras distintas: en un caso se ha calculado el área de los afloramientos permeables, y en otro la superficie de infiltración efectiva, es decir, la fracción susceptible de ser recargada mediante operaciones de recarga artificial.

De acuerdo con esta división, las superficies correspondientes a los afloramientos permeables tienen una extensión de 28,687 km² en el sector o ramal oeste, y de 12,415 km² para el este, cuyo contorno se presenta en la Fig. 2.50.

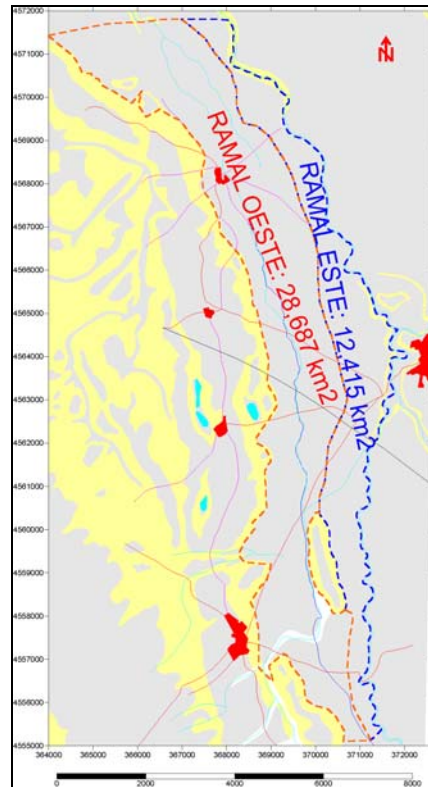


Fig. 2.50. Poligonal envolvente de los ramales este y oeste (41,062 km²). Posición y área calculada. Facies terciarias de baja permeabilidad (amarillo) y arenas cuaternarias (gris). Figura sin escala.

Superficies:

- Ramal oeste: 28,687 km².
- Ramal este: 12,415 km².

Resultados de infiltración:

- Balance hídrico: 44,39 l/m² (período 2002/03).
- Método de Thornthwaite: 39,5 l/m² (período 2002/03).
- Modelo Help: 50,47 l/m² (cuatrienio 1999/2002).
- **Valor medio: 44,78 l/m².**

Los resultados de infiltración obtenidos al aplicar las distintas metodologías en cada uno de los sectores son (Tabla 2.15):

	SECTOR OESTE	SECTOR ESTE	TOTAL
Superficie de afloramientos permeables (km ²)	28,687	12,415	41,102
Infiltración B. Hid (hm ³ /año)	1,273	0,551	1,824 hm³/año
Infiltración Thornthwaite (hm ³ /año)	1,133	0,490	1,623 hm³/año
Infiltración HELP (hm ³ /año)	1,447	0,626	2,073 hm³/año
Valor medio (1999-2003) (hm ³ /año)	1,285	0,556	1,841 hm³/año

Tabla 2.15. Resultados de infiltración obtenidos al aplicar las tres metodologías descritas

De este modo, la infiltración procedente del agua de lluvia para la totalidad de la zona de estudio oscila entre **1,623 y 2,073 hm³/año** para el período considerado.

- ***Infiltración de la escorrentía superficial***

Existe una fracción del agua de lluvia que constituye la escorrentía superficial, y que, al discurrir por el terreno, se infiltra en forma de “infiltración diferida”, según se ha podido constatar en campo tras períodos de precipitaciones fuertes.

La red de drenaje superficial en la zona de estudio es prácticamente nula en el sector este de la Cubeta de Santiuste, mientras que en el oeste es de escasa relevancia y se infiltra la mayor parte de la precipitación.

Considerando los datos de infiltración calculados por el método de Thornthwaite, en el sector este la escorrentía se infiltra en su totalidad o va a parar a los cauces fluviales de los ríos Voltoya y Eresma. En el oeste, de acuerdo con los cálculos presentados (*en IRYDA, 1990*), se considera que una fracción del 60% de la lluvia útil en la subcuenca de recepción (planimetrada en 28,687 km²) forma parte de las entradas en el balance hídrico. De acuerdo con esto, las entradas en el sector oeste se evalúan en 1,02 hm³/año, mientras que para el sector este se consideran nulas.

El sector occidental presenta numerosos regajos ocasionales que drenan las colinas de materiales terciarios que delimitan la *Cubeta* por el oeste, dirigiendo la precipitación de agua de lluvia al sector occidental de la *Cubeta* por su margen oeste. De esta forma, considerando la extensión de la subcuenca hidrográfica vertiente (desde la “línea de cumbres” hasta el contacto con los afloramientos permeables) se ha planimetrado una superficie de 10,86 km², descontando las entradas evaluadas como cauces. Teniendo en cuenta que la lluvia útil calculada para el período de estudio es de 59,38 mm, el caudal máximo entrante a la *Cubeta* a través de cursos de agua estacionales asciende a 0,644 hm³/año para el sector oeste, mientras que en el este la cifra es despreciable.

- ***Entradas al sistema a través de cursos de agua superficiales***

El sector occidental presenta numerosos regajos que drenan las colinas de materiales terciarios que delimitan la *Cubeta* por el oeste, cuya aportación ha sido cuantificada como escorrentía superficial.

De todos estos regajos cabe destacar uno, por presentar un caudal relevante incluso en las medidas realizadas en la época estival. Se trata de la confluencia del colector del Albillo con el del Estanquero, al sur de la localidad de Santiuste de San Juan Bautista, que drenan un afloramiento de arenas aislado y conectado de la *Cubeta* a través de estos arroyos y del “*polo frío sureste*”. Este arroyo conecta con la *Cubeta* a través de una chopera, que presenta frecuentes rezumes y manantiales asociados a su funcionamiento, como es el caso de la *Fuente Torrecilla* (nº 312 del inventario). Por tanto, esta agua procede de un pequeño acuífero cuaternario que se encuentra desconectado, excepto por este punto, de otros acuíferos.

Los caudales aforados en estos colectores oscilan entre 0,5 y 7 l/s (medidas de aforos puntuales realizadas en agosto de 2002 y marzo de 2004). El caudal medio del

arroyo se ha estimado en 1,8 l/s, lo que representa una entrada de agua en la *Cubeta* de **0,056 hm³/año** (sector oeste). El caudal de las fuentes y manantiales asociados queda incorporado en este volumen, dado que el aforo se ha realizado aguas debajo de su confluencia, exceptuando el caudal de la Fuente Torrecilla (apartado próximo).

- ***Entradas al sistema a través de manantiales***

Hay tres manantiales situados en el extremo occidental del sector oeste de la *Cubeta* a través de los cuales se produce una entrada de agua en el sistema adicional a la transferencia subterránea. Estos manantiales corresponden a los puntos del inventario 229 (*Alto de la Urraca*), 248 (*Fuente de La Hiruela*) y 312 (*Fuente Torrecilla* y paraje *El Vallejo*). Sus características se presentan a continuación (Tabla 2.16):

Nº f	X	Y	Z	NAT	C. (µS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	Q (l/s)	fecha	toponimia	observaciones
229	367220	4559418	813.3	M					0.2	23/07/2003	Alto de la Urraca	polo frío O 1
248	367579	4558949	814.7	M					0.2	23/07/2003	La Hiruela	polo frío O 2
312	368537	4556643	819.8	M	760	7.65			0.3	24-Mar-03	Torrecilla	Polo frío SO

Tabla 2.16. Manantiales en el sector oeste del área de estudio.

Se han realizado mediciones puntuales de los caudales en septiembre de 2002, marzo y julio de 2003, y febrero de 2004. Como proedio se estima una entrada de agua al sistema (sector oeste) de 0,7 l/s de forma continua, lo que equivale a **0,022 hm³/año**.

- ***Volumen abastecido del exterior de la subcuenca hidrográfica (importaciones)***

En la actualidad el abastecimiento urbano se lleva a cabo a través de una red de distribución que, originariamente, capta las aguas del cauce del río Eresma en la localidad de Villeguillo, para recibir un tratamiento posterior de extracción del arsénico.

Dado que son aguas captadas del río Eresma que entran en la *Cubeta* mediante conducciones de alta eficiencia, este volumen puede ser considerado una entrada adicional al sistema, ajena a todos los balances previos realizados.

Las extracciones para abastecimiento urbano de los pueblos situados en la subcuenca, Santiuste, Coca y Villeguillo, con 759, 2.100 y 150 habitantes empadronados respectivamente, y considerando un consumo de 516, 100 y 200 l/hab/día respectivamente (según los datos obtenidos de las encuestas facilitadas por los Ayuntamientos de las respectivas localidades), asciende a 314.000 m³/año, incluyendo las industrias conectadas a la red de abastecimiento, o 0,314 hm³/año (Tabla 2.17).

SANTIUSTE	COCA	VILLEGUILLO	TOTAL
143.000 m ³ /año	160.000 m ³ /año	11.000 m ³ /año	314.000 m³/año

Tabla 2.17. Consumos de agua en las localidades de la zona de estudio. Datos de encuestas.

- ***Retornos al sistema procedentes de las importaciones***



El retorno al sistema de este volumen trasvasado es el correspondiente al retorno en forma de aguas residuales. En el caso de Santiuste y Villeguillo (poblaciones carentes de EDAR) el retorno se produce a la propia *Cubeta*, mientras que Coca vierte a depuradora y de ahí al exterior.

Para calcular el volumen que retorna al sistema, se han realizado aforos puntuales en las caceras de vertido de aguas residuales de ambas localidades, eligiendo horas del día comprendidas entre el caudal punta y el valle. Los caudales oscilan en torno a 5 y 1 l/s respectivamente, que se infiltran en su totalidad en alrededor de 1 km de recorrido. Por tanto, el retorno al sistema, de forma aproximada, sería (Tabla 2.18):

RETORNOS	SANTIUSTE	COCA	VILLEGUILLO	TOTAL
PORCENTAJE				
VOLUMEN	0,15 hm ³ /año	0 m ³ /año	0,03 hm ³ /año	0,18 hm³/año

Tabla 2.18. Retornos al sistema del agua de abastecimiento importada del exterior de la Cubeta (Fuente propia).

A efectos de cálculo, este volumen es una fracción que se incorpora al acuífero procedente de las importaciones, independiente de las entradas restantes.

• Retornos de riegos

Las salidas del acuífero por bombeo de captaciones destinadas al regadío oscilan entre 2,649 y 2,966 hm³/año (según se justifica en el próximo apartado).

En principio, se diferencian dos tipos de retornos de riego diferentes por su origen. Por un lado hay una fracción correspondiente a retornos que proceden de pozos o minisondeos que explotan el acuífero superficial. En general, visto el tipo de riego, coordinado principalmente por agricultores no mancomunados con una eficiencia de regadío media (riego en general por aspersión, excepto el sector norte donde hay riego focalizado), la práctica es cubrir las necesidades hídricas de los cultivos sin apenas excederlas. A pesar de ello hay retornos procedentes de las captaciones superficiales.

Existe una fracción del agua aplicada en la *Cubeta* que procede de sondeos profundos, y, por tanto, del acuífero regional, que entra en el sistema como “importación”.

Se ha realizado un estudio en una zona piloto de Ciruelos de Coca. Un agricultor cultiva cuatro hectáreas de patatas desde una única captación, de la que extrae alrededor de 1500 m³/ha. Esto representa un total de 375 m³/año para cada hectárea. Según diversas fuentes consultadas, la necesidad hídrica de la patata ronda los 300 m³/ha/año (CHD, 1998 y Martínez, 2002). El exceso, de 75 m³/año, se distribuye en forma de evapotranspiración (regadío por aspersión durante las horas de luz), y retornos de riegos.

En una primera aproximación al elenco de regadíos, se estima que hay cerca de 300 has con cultivos de féculas en la *Cubeta*, en los que retorna al sistema en torno al 10% del riego aplicado, excluida la evaporación directa inherente al riego por aspersión.

De acuerdo con el caso planteado, si tenemos en cuenta que los retornos de riego calculados para la zona se estiman en un 10%, el volumen de retorno es de 0,26 a 0,30 hm³/año, bien del acuífero superficial o del profundo. De ellos, la gran mayoría se concentra en el sector oeste, mientras que en el este predominan los cultivos de secano, intercalados en los pinares, y pequeños minifundios en riego, con frecuencia con aguas bombeadas desde los cauces fluviales. De este modo, los retornos de riego en el sector este serán ligeramente superiores a cero (Tabla 2.19).

	SECTOR OESTE	SECTOR ESTE	TOTAL
Aportación (hm ³ /año)	0,26 a 0,30	> 0	0,26 a 0,30 hm³/año

Tabla 2.19. Estimación de los retornos de riego al sistema. La carencia de un elenco de regadíos apropiado ha impedido realizar un cálculo de mayor precisión, por lo que la horquilla de valores planteada se basa en una interpretación apoyada en datos parciales.

9.3.1.2. Recargas. Aportaciones subterráneas

A lo largo de la Cubeta de Santiuste se puede hablar de un flujo subsuperficial e indirecto, procedente de los depósitos de terrazas y de los aluviales que descargan al acuífero del sector oeste de la *Cubeta*. Estos puntos quedan ubicados en el extremo meridional de la *Cubeta* y en afloramientos transversales, de orientación este-oeste, localizados en el sector occidental y que funcionan como drenes.

Se han detectado tres puntos en los que hay un caudal subterráneo entrante en la *Cubeta*, que son:

- Transferencia oeste: se trata de una zona por la que entra agua a la *Cubeta* procedente del drenaje de las colinas terciarias y materiales cuaternarios localizados al norte de Santiuste. La franja tiene 763 m de anchura, y en ella hay abundancia de vegetación freatofítica y una fuente, si bien no se ha apreciado la presencia de ningún curso de agua superficial.
- Transferencia suroeste: Se trata de la zona de conexión entre los afloramientos de materiales cuaternarios localizados al suroeste de la *Cubeta*. La transferencia se produce a través de un regajo superficial, que corre la mayor parte del año, una fuente y una fracción subterránea a través de una franja de unos 621 m de anchura.
- Transferencia sur: corresponde al límite de la envolvente de la *Cubeta* por el sur. Se trata de una franja de 927 metros por la que entra un volumen de agua de componente subterránea en su totalidad en el ramal este. De acuerdo con la cartografía hidrogeológica existen líneas de flujo que conectan esta sección con el río Voltoya, que funcionaría como eje drenante.

Las entradas subterráneas por estos lugares quedan canalizadas y delimitadas por afloramientos de Facies Cuestas, que demarcan los perfiles por ambos lados y por el basamento margoso del acuífero cuaternario. Los límites superior e inferior han sido trazados a partir del MDT y de la malla de espesores del mapa de isopacas (Fig. 2.28).

Los caudales subterráneos entrantes en la *Cubeta* han sido estimados mediante la aplicación de la ley de Darcy en tres perfiles de transferencia a través del acuífero arenoso.

De la intersección entre el límite de estas dos unidades con respecto al nivel freático de febrero de 2003, se obtiene el área saturada para cada sección (A).

Con la intención de cumplir los condicionantes necesarios para una correcta aplicación de la ley de Darcy, en la ubicación de estos perfiles se ha buscado la máxima perpendicularidad entre la sección idealizada y las líneas de flujo subterráneo obtenido para las arenas (acuífero superficial).

La expresión de la ley de Darcy, en notación diferente a la presentada con anterioridad, es:

$$Q = K \cdot A \cdot i$$

Donde:

- Q = caudal (m³/día)
- K = permeabilidad (m/día)
- A = área de la sección atravesada (m²)
- i = gradiente hidráulico

La posición exacta de estos perfiles, junto con los valores de los parámetros restantes, se sintetizan en la Tabla 2.20:

	Perfil oeste	Perfil sudoeste	Perfil sur
X (max)	368854	369297	371530
X (min)	368624	368711	370604
Y (max)	4559999	4557315	4555129
Y (min)	4559271	4557109	4555098
Longitud del perfil en superficie (m)	763	621	927
Área (m²)	40	136	422
Permeabilidad (m/día)	14	15	15
Gradiente hidráulico	0.025	0.014	0.01
Caudal (m³/día)	14	28.56	63,3

Tabla 2.20. Presentación tabulada de los datos y resultados del cálculo darciniano aplicado para evaluar las aportaciones subterráneas a la Cubeta.

De acuerdo con este cálculo, el caudal entrante asciende a **105,86 m³/día** o **0,039 hm³/año**.

La entrada por transferencias subsuperficiales a la *Cubeta* se cifran, por tanto, en **1.021,44 m³/año** o **0,001 hm³/año** (Tabla 2.21).

	SECTOR OESTE	SECTOR ESTE	TOTAL
Aportaciones subterráneas (hm ³ /año)	0,001 hm ³ /año	0	0,001 hm³/año

Tabla 2.21. Aportaciones subterráneas calculadas.

• **Total entradas**

Infiltración ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Escorrentía ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Importaciones ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Manantiales ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Cauces ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Retornos riego ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Recargas ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Total ($\text{hm}^3/\text{año}$)
1,623 (Thornthwaite)	1,020+0,644	0,18	0,022	0,056	0,30	0,039	3,857
1,841 (B.H.)	0,34+0,644	0,18	0,022	0,056	0,26	0,039	3,382
De 2,825 a 3,287		0,18	0,022	0,056	0,26 a 0,30		De 3,382 a 3,884

Tabla 2.22. Entradas del balance hídrico con desglose de los componentes.

El volumen de agua entrante en la zona de estudio en el período 1999-2003 oscila entre **3,382 y 3,884 $\text{hm}^3/\text{año}$** . El valor elegido para el cierre del balance es de **2,496 $\text{hm}^3/\text{año}$** , correspondiente al valor medio.

NOTA: Los resultados de la infiltración del agua de lluvia obtenidos del modelo de precipitación-aportaciones HELP (*en MAPA, 2003*), han sido excluidos por corresponder a un cuatrienio que termina el año anterior al año hidrológico para el que se ha calculado el balance, además de por presentar valores sobredimensionados con respecto a los restantes métodos.

9.3.1.3. Salidas

• **Regadío**

Las salidas por bombeo, considerando los datos del inventario en cuanto al número de captaciones en uso (123) y el resultado de las encuestas en cuanto al caudal de extracción, son:

- Pozos y minisondeos en uso (inferiores a 75 m): (112 en total)
- Sondeos intermedios en uso (entre 75 y 150): (9 en total)
- Sondeos profundos en uso (más de 150 m): (5 en total)

Las premisas de cálculo presentadas en MAPA (1999a), suponían unas extracciones de las captaciones en explotación contando con una conexión de cada pozo con diez aspersores y un caudal de bombeo de 1.200 l/hora cada uno, 12 horas al día y 100 días al año.

Este criterio ha sido revisado con encuestas directas. Al tratarse de un año en el que las reservas hídricas son bastante superiores, han aumentado los riegos, resultando más fiable la cifra de 12 aspersores conectados a cada captación, con un caudal de bombeo similar, 14 horas al día y 100 días al año, lo que representa una extracción media de cada pozo de 20.160 $\text{m}^3/\text{año}$. De acuerdo con el nuevo baremo, el resultado del volumen extraído, para el inventario de captaciones actual, asciende a:

- Pozos y minisondeos en uso: 2.257.920 $\text{m}^3/\text{año}$.
- Sondeos intermedios en uso: 181.440 $\text{m}^3/\text{año}$.
- Sondeos profundos en uso: 210.000 $\text{m}^3/\text{año}$ (conectados a 25 aspersores).

De forma que las salidas por bombeo debidas a captaciones destinadas al regadío ascienden a **2,6497 hm³/año**. La cantidad de captaciones de “uso desconocido” en la época de inventario introduce un margen de error adicional de hasta **316.800 m³/año**.

- **Abastecimiento urbano e industrial**

Las captaciones conocidas destinadas al abastecimiento urbano e industrial no conectadas a la red de suministro son 6. Con datos de encuestas directas, se estima un caudal de explotación aproximado de (Tabla 2.23):

SANTIUSTE	COCA	VILLEGUILLO	TOTAL
60.000* m ³ /año	100.000* m ³ /año	5.000* m ³ /año	165.000* m³/año

Tabla 2.23. Estimación del caudal de explotación a través de captaciones destinadas al abastecimiento urbano e industrial no conectadas a la red de suministro.

NOTA*: Datos obtenidos de las encuestas facilitadas por los Ayuntamientos de la zona de estudio realizadas en el año 2003.

- **Captaciones destinadas al abastecimiento ganadero**

Consultando el censo ganadero del MAPA del año 1998, la evaluación de las extracciones se ha realizado a partir del cálculo del volumen consumido, descontando las granjas abastecidas por red con captaciones superficiales.

En la tabla 2.24 sintetiza el volumen de agua destinada a abastecimiento de ganadería, basándose en estimaciones de consumo por las necesidades hídricas de la cabaña ganadera (en MAPA, 1999a).

Ganadería	Nº	CONSUMO	TOTAL
Vacuno de ordeño	3.234	15,18 l/d	49.092,12 l
Vacuno de no ordeño	4.584	14,45 l/d	66.238,8 l
Plazas de cebo	2.066	18	37.188
Ovejas	9.784	5?	48.920
Cabras	305	5?	1.525
Cerdas reproductoras	4.815	10 – 20 l/d	72.225
Cerdos de cebo	26.866	4 – 7 l/d	147.763
TOTAL	-	-	422.951 l/día = = 0,154 hm³/año

Tabla 2.24. Consumos calculados por necesidades hídricas de la cabaña ganadera.

USO AGRÍCOLA	USO GANADERO	AB. URBANO	AB. INDUSTRIAL	TOTAL
2,649 a 2,966 hm³/año	0,154 hm³/año	0 hm³/año	0,165 hm³/año	2,968 a 3,285 hm³/año

Tabla 2.25. Consumos calculados totales para la zona de estudio. Año hidrológico 2002/03.



- **Salidas por cauces superficiales**

Los estudios foronómicos realizados entre 1999 y 2004 en los cauces de los ríos Voltoya y Eresma por el MAPA (*en MAPA, 2003*) demuestran que los ríos son efluentes o conservativos, sin haber apreciado indicios de influencia en su trazado.

La infiltración procedente del caudal de base de los ríos por infiltración por el fondo es destinada al acuitardo terciario en su mayor parte, quedando el acuífero cuaternario por encima del nivel de base en todo el trazado. El desagüe calculado en el balance hídrico es cero. En general, la *Cubeta* tiene una capacidad de infiltración suficiente para que la escorrentía superficial sea puntual en el espacio y tiempo y prácticamente nula en dimensiones.

9.3.1.4. Descargas (transferencias subterráneas)

Incluye las salidas a través del acuífero cuaternario eólico más superficial hacia los ríos Voltoya y Eresma, las descargas a manantiales situados en la terraza de éstos, la transferencia subterránea hacia el norte de la *Cubeta*, el caudal de descuelgue por sondeos y la percolación natural a través del acuitardo.

- **Salidas por rezumes y manantiales**

Se han desglosado ambas tipologías por su funcionamiento en la actualidad, si bien ciertos rezumes pueden haber funcionado como manantiales en el pasado y viceversa.

- Rezumes

Esta componente afecta exclusivamente al sector este del acuífero, por sus descargas difusas hacia el cauce de los ríos Voltoya y Eresma. Los caudales estimados se estiman en 0,2 hm³/año, cálculo que involucra también a las descargas producidas por los manantiales (*MAPA, 1999a*).

Se ha realizado un cálculo aplicando la ecuación de Darcy a la fracción de acuífero susceptible de descargar en la margen izquierda de los ríos.

El resultado de este cálculo, para una situación de “aguas muy altas” (año hidrológico húmedo y acuífero bajo la influencia de las operaciones de AR), es de 1.740 m³/día o **0,63 hm³/año**, repartidos del siguiente modo (Tabla 2.26):

	Río Voltoya hm ³ /año	Río Eresma hm ³ /año	TOTAL hm ³ /año
Cálculo Darcy	0,169	0,467	0,636

Tabla 2.26. Volumen de agua cedido a los ríos drenantes por el acuífero en situación de “aguas muy altas”. Año húmedo y operaciones de AR.

- Manantiales

Esta componente afecta exclusivamente al sector este del acuífero, por sus descargas hacia el cauce de los ríos Voltoya y Eresma.

Las salidas del sistema a través de manantiales en la actualidad han sido calculadas por la medición de los caudales de las surgencias localizadas junto al cauce de los ríos. Estos han sido inventariados con la mayor exhaustividad posible, localizados en su mayoría con la ayuda de testimonios y visitas guiadas con la población local. A pesar de los 18 manantiales inventariados, se trataba de una zona manantialosa según testimonios verbales, y gran parte de las surgencias han desaparecido en la actualidad.

De los 18 manantiales, los caudales estimados y los volúmenes de surgencia de la margen izquierda (sector este) se estiman en 1,3 l/s o **0,041 hm³/año**, valores confirmados por los aforos secuenciales (Aptdo. 7.2.1).

• *Drenaje subsuperficial y subterráneo hacia el norte de la Cubeta*

El drenaje subterráneo hacia el norte de la zona de estudio, se ha evaluado al igual que las recargas por transferencias subterráneas, mediante la aplicación de la ley de Darcy. Para este cálculo se ha realizado un perfil Este-Oeste de 1.598 m (distancia entre zonas con presencia de Facies Cuestas en su ZNS), uniendo los puntos de coordenadas:

	X	Y	Z
Extremo oeste	368399	4570615	757.599
Extremo este	366831	4570924	762.445

En este perfil se aprecia una transferencia a través del sector oeste, si bien el sector este tiene un escaso desarrollo en esta zona.

Se ha calculado el área de la sección por su intersección con la capa freática y el techo del acuitardo terciario. El resultado es de 784,18 m² para la situación de junio de 2003 (aguas medias) (Fig. 2.51).

La descarga subterránea hacia el norte de la zona de estudio se ha calculado por el paso de agua a través de tal superficie, suponiendo estas condiciones de contorno:

- El ángulo entre la sección idealizada y el sentido de flujo subsuperficial es de 90°.
- La permeabilidad del acuífero en este punto, atendiendo a los ensayos de laboratorio realizados en sondeos cercanos, es de 46 m/día (K).
- El gradiente hidráulico, calculado a partir de la cartografía hidrogeológica de junio de 2003, es de 3‰ (i).
- La superficie de paso (A) es 784,18 m² para la situación de junio de 2003 (aguas medias).

Aplicando de nuevo la ecuación de Darcy, resulta un caudal de 108,21 m³/día o bien 0,039 hm³/año.



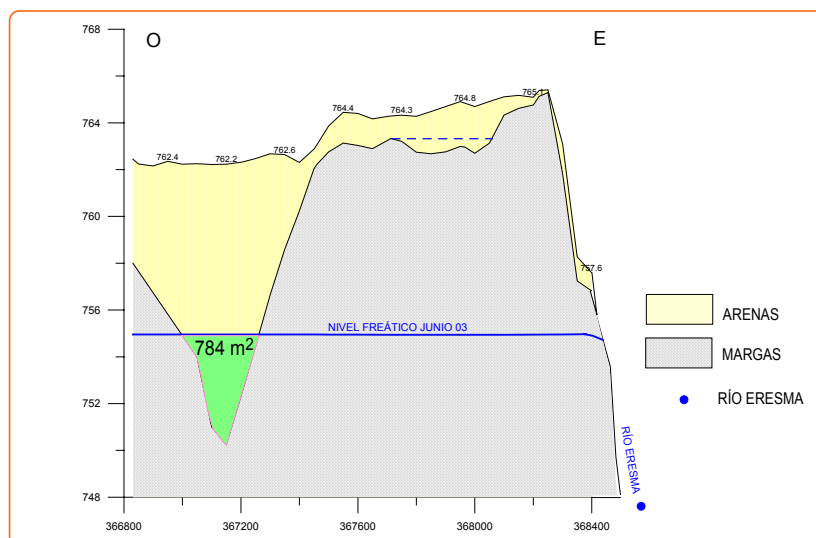


Fig. 2.51. Representación de la sección de transferencia de aguas subterráneas desde la zona de estudio hacia el norte a partir de las mallas generadas para la superficie topográfica y el techo del acuitardo terciario. La capa freática se ha representado para una situación de aguas medias (junio de 2003). El punto en el margen inferior derecho corresponde a la cota del río Eresma.

Este dato resulta muy bajo con respecto al balance hídrico realizado en 1999 (MAPA, 1999a), según el cual se transferiría un volumen de 0,4 hm³/año. Este hecho es debido a que en este volumen quedaba incluido el drenaje de la Cubeta hacia el río Eresma (calculado en el apartado previo), con resultados superiores, como corresponde a una situación piezométrica más alta.

- **Caudal de descuelgue a través de captaciones que intercomunican el acuífero superficial con el multicapa profundo**

Un cálculo adicional realizado ha sido el caudal de descuelgue teórico (volumen desprendido a partir del acuífero superficial) a través de las siete captaciones que se ha detectado que descuelgan aguas desde el acuífero superior hacia el inferior. De ellas cuatro se encuentran en el sector izquierdo y tres en el derecho (Aptdo. 6.2.4).

El cálculo del caudal de descuelgue desde el acuífero superficial arenoso hacia los inferiores se ha realizado considerando que se cumplen los requisitos específicos para la validez de la ecuación general del flujo de Darcy. El desarrollo y la ecuación final empleada para el cálculo del caudal de descuelgue en régimen permanente parte de la expresión darciniana:

$$Q = A \cdot K \cdot i$$

Donde:

- Q: Caudal de descuelgue (m³/día).
- A: Superficie de descuelgue a través de la perforación. En este caso corresponde al perímetro de la captación (2πR), por el espesor saturado entre la cota de inicio de descuelgue [medida en campo (b')] y el muro del acuífero cuaternario [deducido de la reconstrucción geométrica del acuífero (b)].

$$A \text{ (m}^2\text{)} = 2\pi R \text{ (m)} [b-b'] \text{ (m)}$$

- K: Permeabilidad horizontal (m/día). Se ha deducido a partir de los datos de transmisividad obtenidos por la interpretación de ensayos de bombeo en la captación aforada más cercana (en el caso de la captación n.º 99 hay resultados de un ensayo realizado en la propia captación) partido por el espesor saturado.

$$T \text{ (m}^2\text{/día)} = Kh \text{ (m/día)} \cdot b \text{ (m)}$$

- i: Gradiente hidráulico calculado entre una captación dentro del radio de influencia y el inicio del nivel de descuelgue. Resulta de la diferencia entre la cota del nivel freático en el pozo elegido dentro del radio de influencia y la cota de inicio de descuelgue en el mismo sondeo, partido por la distancia entre ambas captaciones.

$$i = \text{cota n.e. pozo} - \text{cota n.e. inicio descuelgue en sondeo} / \text{distancia p-s}$$

El caudal de descuelgue medio para cada punto de agua depende del diámetro y de la conductividad hidráulica del acuífero en el emplazamiento de la captación, así como del gradiente hidráulico. El caudal resulta de aplicar la fórmula:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot b' \cdot \frac{dh}{dl} \cdot Kh$$

El radio de los sondeos oscila entre 175 y 300 mm. La permeabilidad para las zonas donde están ubicados oscila entre 15 y 42,1 m/día, de acuerdo con los datos del Apto. 8.2.2. Para Ø= 500 mm y $K_h = 42,1$ m/día, el caudal resultante es:

$$Q = 2 \cdot 3,1416 \cdot 0,25 \text{ m} \cdot 21,05 \text{ (m)} \cdot 0,035 \cdot 42,1 \text{ (m/día)} = 48,72 \text{ m}^3\text{/día.}$$

- Para 175 mm, el caudal oscila entre 12,15 y 34,10 m³/día = de 0,14 a 0,39 l/s.
- Para 200 mm, el caudal oscila entre 17,36 y 34,10 m³/día = de 0,20 a 0,39 l/s.
- Para 300 mm, oscila entre 20,83 y 58,46 m³/día = de 0,24 a 0,68 l/s.

Atendiendo a criterios relativos a la profundidad de la captación, la distribución de los filtros y especialmente de su diámetro, se ha estimado un caudal de descuelgue total que oscila entre 0,5 y 0,7 l/s, distribuidos en 2,2 l/s para el sector occidental y 1,7 l/s para el oriental, lo que corresponde a 0,069 y 0,053 hm³/año respectivamente (Tabla 2.27).

	SECTOR OESTE hm³/año	SECTOR ESTE hm³/año	TOTAL hm³/año
CALCULO DARCY	0,069	0,053	0,122

Tabla 2.27. Volúmenes descolgados hacia el acuífero profundo a través de sondeos penetrativos conocidos (hm³/año).

A esta cifra hay que añadir el volumen transferido por drenaje natural hacia el acuífero profundo a través del acuitardo.

Esta cifra puede estar subdimensionada, al no haber sido posible visitar la totalidad de captaciones de la zona de estudio por impedimento de sus propietarios, especialmente



en el sector norte, donde abundan los sondeos profundos y labores de regadío intensivas tras la concentración parcelaria.

- **Percolación hacia el acuífero profundo**

La percolación hacia niveles inferiores del acuífero se produce a través de las Facies Cuestas. Se ha calculado el descuelgue a partir de dos métodos distintos:

- **Cálculo darciniano**

A partir de los datos relativos a los parámetros hidráulicos, se ha calculado el caudal descendente a través del sustrato de la zona de estudio. Considerando unos valores de permeabilidad entre la horquilla de $1.1 \cdot 10^{-6}$ y $9.8 \cdot 10^{-7}$, con una velocidad de infiltración de $V_i = 1.5 \cdot 10^{-3}$ m/día (*Galán de Frutos, 1995*), y $K_v = 0,00005$ m/día (*MOPTMA, SGOP, 1994*), un gradiente hidráulico unitario, y una superficie total de $41,1 \text{ km}^2$, se estima un volumen de agua en flujo semidescendente por percolación de:

$$Q = 41.062.000 \text{ m}^2 \cdot 0,00005 \text{ m/día} \cdot 0,01$$

$$Q = 2,53 \text{ m}^3/\text{día} = 0,64 \text{ hm}^3/\text{año}$$

- **Operaciones de álgebra de mapas**

El segundo procedimiento está basado en operaciones de álgebra de mapas a partir de datos reales. Para ello se ha realizado la sustracción de las reconstrucciones de la capa freática para el acuífero profundo entre dos situaciones consecutivas de aguas altas (febrero de 2003) y bajas (septiembre de 2002). Estas operaciones y las cartografías respectivas se presentan en el Apto. 8.3.3.

Este resultado representa una variación volumétrica del acuífero profundo en la zona de estudio total, es decir, evalúa el caudal percolado de forma natural junto con el de descuelgue a través de sondeos penetrativos, además de las variaciones ocurridas sin la presencia de estos elementos.

El volumen cubicado es de **55.366.904 m³**. Si consideramos un coeficiente de almacenamiento para el acuífero regional profundo del 2% (*MIMAM, 2002*), la variación en el almacenamiento bajo la poligonal envolvente de la zona de estudio entre las cotas 724 y 748 msnm es de **1,107 hm³/año** (Tabla 2.28).

	SECTOR OESTE hm ³ /año	SECTOR ESTE hm ³ /año	TOTAL hm ³ /año
Calculo Darcy	0,45	0,19	0,640
Caudal descuelgue	0,069	0,053	0,122
Total	0,519	0,243	0,762
Álgebra mapas	0,773	0,334	1,107

Tabla 2.28. Volúmenes percolados hacia el acuífero profundo calculados aplicando distintas metodologías (valores en hm³/año).

La anchura de la horquilla de valores es atribuible a todos los parámetros con alto grado de indeterminación del sistema, destacando los parámetros hidráulicos empleados en los cálculos (obtenidos de la bibliografía), resultados de modelos de precipitación-aportaciones bibliográficas, elaboración de cartografías hidrogeológicas con siete puntos de control, etc.

- **Total salidas**

Los cálculos y estimaciones quedan sintetizados en la Tabla 2.29.

	Extracciones pozos y sondeos (hm ³ /año)	cauces (hm ³ /año)	Rezumes y manantiales (hm ³ /año)	Percolación (hm ³ /año)	Descuelgue sondeos (hm ³ /año)	Drenaje subterráneo al norte (hm ³ /año)	TOTAL (hm ³ /año)
Mín.	2,968	0	0,2+0,041	0,640	0,122	0,039	4,010
Máx.	3,285	0	0,636+0,041	1,107		0,039	5,108
Horquilla	2,968 a 3,285	0	De 0,241 a 0,677	0,762 a 1,107		0,039	De 4,010 a 5,108

Tabla 2.29. Salidas del balance hídrico desglosadas para la Cubeta en el año hidrológico 2002/03.

9.3.2. Cierre del balance hídrico en la Cubeta de Santiuste para el año hidrológico 2002/03

De todos los términos del balance, resta conocer la variación en el almacenamiento y el error de cierre.

La fracción de entradas correspondientes a operaciones de recarga artificial (AR) se calcula más adelante (Aptdo. 10.3).

El resultado de aplicar dicha ecuación es (Tablas 2.30 a 2.32):

TOTAL ENTRADAS:

Infiltración (hm ³ /año)	Escorrentía (hm ³ /año)	Importaciones (hm ³ /año)	Recargas (hm ³ /año)	Manantiales (hm ³ /año)	Cauces (hm ³ /año)	Retornos riego (hm ³ /año)	TOTAL (hm ³ /año)
1,623 (Thornthwaite)	1,020+0,644	0,18	0,039	0,022	0,056	0,30	3,857
2,073 (HELP)	0	0,18	0,039	0,022	0,056	0,26	2,630
1,841 (B.H.)	0,34+0,644	0,18	0,039	0,022	0,056	0,26	3,382
De 2,825 a 3,287		0,18	0,039	0,022	0,056	0,26 a 0,30	De 3,382 a 3,884

Tabla 2.30. Entradas del balance hídrico desglosadas. Cubeta de Santiuste. Año hidrológico 2002/03.

	Extracciones pozos y sondeos (hm ³ /año)	cauces (hm ³ /año)	Rezumes y manantiales (hm ³ /año)	Percolación (hm ³ /año)	Descuelgue sondeos (hm ³ /año)	Drenaje subterráneo norte (hm ³ /año)	TOTAL (hm ³ /año)
min	2,968	0	0,2+0,041	0,640	0,122	0,039	4,010
Máx	3,285	0	0,636+0,041	1,107		0,039	5,108
horquilla	2,968 a 3,285	0	De 0,241 a 0,677	0,762 a 1,107		0,039	De 4,010 a 5,108

Tabla 2.31. Salidas del balance hídrico desglosadas. Cubeta de Santiuste. Año hidrológico 2002/03.

ENTRADAS	Infiltración directa del agua de lluvia	De 2,825 a 3,287 hm ³ /año	
	Infiltración a través de la escorrentía superficial		
	Importaciones		0,18
	Entradas por arroyos		0,056
	Retornos de riegos		0,26 a 0,30 (0,28)
RECARGAS	Recarga artificial del acuífero	0,933 a 1,344 ⁵ hm ³ /año	
	Flujo subsuperficial y manantiales entrantes		0,061 hm ³ /año
SALIDAS	Salidas por bombeo:		
	Destino del agua de las captaciones:		
	Regadíos	2,649 a 2,966 hm ³ /año	
	Abastecimiento urbano	(Importaciones)	
	Abastecimiento industrial	0,165 hm ³ /año	
	Abastecimiento ganadero	0,154 hm ³ /año	
	Salidas por cauces superficiales.	0*	
	Percolación hacia el acuífero profundo.	0,762 a 1,107 (1,0) hm ³ /año	
DESCARGAS	Descargas Manantiales y rezumes	De 0,241 (0,3) a 0,677 hm ³ /año	
	Drenaje subsuperficial y subterráneo hacia el norte de la <i>Cubeta</i>	0,039 hm ³ /año	
TOTAL	E (de 3,382 a 3,817) + (AR) - S (De 4,010 a 5,108)= ΔV	De - 0,628 a -1,291 hm ³ /año (promedio = -0,959 hm ³ /año	
	/AR = volumen de entradas por recarga artificial.	3.422- 4.307= 0.885 hm ³	

Tabla 2.32. Datos disponibles para la resolución de la ecuación general del balance hídrico. Cubeta de Santiuste. Año hidrológico 2002/03.

El cierre del intervalo de la horquilla de valores posibles requiere el análisis detallado de los componentes del balance.

En las entradas por precipitación, el valor intermedio (2,825 hm³) parece ser el más apropiado para establecer comparaciones, al haber sido el empleado en los balances previos de 1990 y 1999. Por otro lado, es ligeramente superior al cálculo por el método de Thornthwaite, que ha sido empleado en otras situaciones en el área de estudio con valores, en general, infradimensionados (MAPA, 2001; Galán et al, 2001a).

En cuanto a las importaciones, se ha medido el caudal que retorna al sistema en forma de aguas residuales (0,18 hm³), si bien la importación es casi el doble (0,314

⁵ Este volumen ha sido calculado en apartados posteriores, si bien se anticipa con objeto de cerrar el balance.

hm³). Existe una fracción consumida en abastecimiento que no retorna al sistema o que se pierde en forma de fugas por la eficiencia del alcantarillado y conducciones. De este modo, se podría hablar de una eficiencia de la red del 80% (según encuestas directas) y un volumen adicional de 0,02 hm³.

Los retornos de riego son de difícil evaluación. La zona con mayor toma de aguas profundas presenta más eficiencia en el riego, mientras que los regadíos particulares se ajustan más al ahorro de excedentes indebidos. De acuerdo con esto, el valor adoptado para evaluar los recursos renovables es el intermedio (0,28 hm³/año).

Conocido el consumo para riego, se considera un valor apropiado el extremo inferior del intervalo por resultar un inventario exhaustivo.

En cuanto a la percolación hacia el acuífero profundo, se considera adecuado el límite superior, al corresponder a una situación calculada con datos de campo reales y empleando un procedimiento de aceptación general (WTF). No obstante, la zona de recarga del acuífero profundo ha aportado un volumen adicional que no procedía del sistema, lo que resultaría sobredimensionado, adoptando un valor de 1 hm³.

La recarga a través de rezumes y manantiales se ha cuantificado para una situación media y otra de máxima abundancia hídrica. Dado que en el período de estudio apenas ha habido fugas detectadas a través de los drenajes naturales del volumen de agua empleado en las operaciones de AR, el valor más apropiado sería cercano al extremo inferior de la horquilla (0,3 hm³), si bien en situación de mayor almacenamiento es previsible que aumente el drenaje natural del acuífero.

De acuerdo con este análisis, los recursos renovables en el año hidrológico 2002/03 ascenderían a 0,88 hm³.

Con respecto a la variación de agua almacenada en el acuífero, su cálculo resulta viable al disponer de mallas que reflejan la situación de la capa freática durante el año hidrológico 2002/03 (Aptdo. 6.2.4.3). El resultado es (Tabla 2.33):

Δ FECHA AH 02/03	Δ Vol. Suelo (hm ³)	Vol agua (hm ³)	Δ Vol. desde inicio ciclo (hm ³)
Sep 03-sep 02	30,056512	3,006	30,056.512

Tabla 2.33. Cálculo de volúmenes mediante el método volumétrico. Totalidad de la superficie de infiltración efectiva de la Cubeta (41,1 km²).

Si se considera un coeficiente de almacenamiento de 10%, la variación en el almacenamiento en el año hidrológico 2002/03 es de aproximadamente 3,00 hm³.

También se calcula que el resultado global para el sumatorio de los incrementos entre el 23 de diciembre de 2002 (primera medición de la red tras el inicio de las operaciones de recarga artificial), y el 24 de marzo de 2003 (situación de máximo almacenamiento registrado), asciende a 1,344 hm³ para la zona de influencia del bulbo de humidificación dentro del sector oeste (28,687 km²). Para la totalidad de la Cubeta este volumen sería superior, si bien no hay datos suficientes para su cálculo.

$$E \text{ (de 3,382 a 3,817) } + (AR) - S \text{ (De 4,010 a 5,108) } = \Delta V \text{ +/- } \varepsilon$$



- Media intervalo oscilación entradas: 0,435.
- Media intervalo oscilación salidas: 1,098
- Diferencia: 0,663

$$E + AR - S = \varepsilon \gg \gg AR = (-/+ \Delta V) +/- \varepsilon$$

$$AR = + 3,006 - 0,663 +/- \varepsilon \gg \gg AR = 2,343 +/- \varepsilon$$

El sistema se convierte en una sola ecuación con dos incógnitas, el volumen aportado como recarga artificial y el error de cierre.

La máxima variación en el almacenamiento como consecuencia de la recarga artificial podría ascender hasta 2,121 hm³, volumen que resulta del agua y aire infiltrados en el acuífero. El cálculo del volumen neto infiltrado conlleva la estimación de la fracción aire, o la medida directa tras la desaireación del acuífero, teniendo en cuenta que los riegos comienzan antes de que el acuífero se haya desaireado en su totalidad.

El volumen de agua derivado del río Voltoya en el primer ciclo de recarga artificial no fue controlado con precisión, pero, de acuerdo con los cálculos realizados, osciló entre 3,77 y 4,03 hm³ (conviene recordar que fue un año hidrológico especialmente húmedo). El valor medio es de 3,9 hm³/año, equivalente a un caudal de 310 l/s. Este volumen disponible coincide a *grosso* modo con el módulo interanual del acuífero, que para la situación del año hidrológico 2002/03 oscila en torno a 0,96 hm³.

Como observaciones adicionales conviene destacar los siguientes puntos:

El balance al inicio del año hidrológico, y previamente al inicio de las operaciones de AR, era claramente deficitario a aquel ritmo de extracción de las aguas subterráneas. El déficit al comienzo del ciclo era de aproximadamente -0,3 hm³/año en el volumen de agua renovable (al que hay que añadir el descenso acumulado durante décadas de sobreexplotación). Este valor es coincidente con el déficit anual medio registrado en 1990, y representa un descenso respecto al registrado en 1999 (-0,7 hm³/año).

El aumento de los cultivos y de los volúmenes extraídos para riego (especialmente en la zona norte), compensados con la importación de aguas al sistema desde el exterior para abastecimiento urbano (en torno a 0,314 hm³/año), ha incrementado el volumen de recursos renovables, que podría llegar a cerca de 1 hm³.

El volumen de agua transferido hacia y desde el sistema corresponde al flujo subsuperficial, sin evaluar los posibles flujos existentes en los acuíferos más profundos o los flujos adaptados a circuitos regionales de circulación.

Comparando los resultados obtenidos con los balances previos, el déficit calculado para el año tipo medio y unos datos meteorológicos hasta 1989 era de 0,3 hm³/año (*IRYDA, 1990*), en 1999 el acuífero estaba sobreexplotado y su déficit fue calculado en 0,73 hm³/año anuales a sumar al déficit acumulado cercano a 4 hm³ (*MAPA, 1999a*).

La concurrencia de un período húmedo y del inicio de las operaciones de AR empiezan a minimizar el déficit hídrico acumulado que presentaba el acuífero. En su régimen de explotación actual sería suficiente con conseguir una recarga anual de 0,4 hm³,

tras cubrir completamente el déficit inicial, siempre y cuando se mantenga la tendencia climática de los dos últimos años hidrológicos.

El déficit acumulado inicial (4 hm^3) ha sido cubierto en gran medida en el primer ciclo de recarga artificial, que ha aportado al acuífero cerca de 2 hm^3 , y, previsiblemente, el volumen recargado permitirá aumentar el módulo interanual o volumen de agua disponible al término del segundo ciclo.

En vista de estos resultados numéricos, se abre una interesante puerta a la investigación-acción, que posibilitará aumentar el módulo interanual del acuífero y la disponibilidad de recursos. Este hecho permitirá desarrollar opciones poco contempladas hasta ahora, como son la implantación de nuevos regadíos y el empleo de recursos hídricos para objetivos medioambientales, destacando la recuperación de humedales degradados aplicando técnicas de recarga artificial específicas.

La mayor disponibilidad hídrica permite a los agricultores de la zona implantar nuevos regadíos, de modo que la concentración parcelaria, ya realizada en el sector norte de la *Cubeta*, pero no en el sur, se convierte en una acuciante necesidad para gestionar de forma adecuada la utilización de los recursos.

9.4. CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN NATURAL

El cálculo de la infiltración de agua de lluvia y escorrentía se ha llevado a cabo para el período comprendido entre 1999 y 2003. Estos resultados han sido aplicados al año hidrológico 2002/03, el más húmedo de la serie, con una precipitación total registrada en la estación 2502, de 570,3 mm, superior a la media de los cuatro años considerados (439,1 mm); es decir, en el año hidrológico 2002/03 ha llovido 133,9 mm por encima de la precipitación media del período de cálculo. Esta diferencia influye en el error de cierre (ϵ).

La disociación de la fracción de infiltración de origen natural o inducida por las labores de AR precisa de la aplicación de técnicas complementarias que permitan evaluar con precisión ambas variables. Entre las opciones cabría un seguimiento anual o plurianual de caudales, el establecimiento de dispositivos fijos de infiltración (infiltrómetros) y la elevación en la cadencia de toma de datos.

Cabe mencionar que el conocimiento del volumen adicional infiltrado durante el primer ciclo de recarga artificial pasa por conocer previamente el volumen que se infiltra de manera natural, lo que requiere un análisis de los métodos posibles y la aplicación del más idóneo.

9.4.1. Elección del método de evaluación de la recarga más idóneo

La elección del método más idóneo depende de numerosos factores, antrópicos y del medio físico.

Los primeros están condicionados, especialmente, por la disponibilidad de datos y medios.

En cuanto a los factores del terreno, un factor de peso es la presencia de agua en la superficie del terreno como consecuencia de factores climáticos y/o por los rasgos geomorfológicos superficiales (*Scanlon et al, 2002*). Esto permite diferenciar dos tipos de recarga genéricos (*Lerner et al, 1990 y Lerner, 1997*):

- Recarga localizada, procedente de pequeñas depresiones, drenes, etc.
- Recarga indirecta, procedente de ríos y lagos, y, por ende, de estructuras de AR.

De todos los métodos de evaluación de la recarga (=percolación o infiltración neta) presentados, el más viable para ser aplicado en la zona de estudio resulta el basado en los estudios de la fluctuación del nivel freático, por consideraciones antrópicas y técnicas, método que es conocido mundialmente como WTF, método de fluctuación del nivel del agua o *Water Table Fluctuation*. Se trata de un método indirecto suficientemente preciso si se cuenta con información suficiente, lo que posibilita su empleo habitual, dada su independencia respecto al desplazamiento del agua en la zona no saturada (*Sophocleous, 2002*).

Está especialmente recomendado para acuíferos libres con el nivel del agua muy somera que no funcionen en régimen transitorio (caso de la Cubeta de Santiuste). Requiere el conocimiento del coeficiente de almacenamiento específico y de su distribución espacial (mapas de suelos) y de las variaciones temporales del nivel (*Healy*

& Cook, 2002). El procedimiento resulta aconsejable cuando hay abundancia de medidas del nivel freático, como es el caso, gracias al seguimiento que realiza el MAPA en la RCP desde 1999; y por su simplicidad para estudiar la variabilidad espacial y temporal. Su control plurianual se convierte en un proceso iterativo, lo que posibilita afinar en la evaluación de los resultados.

Hay algunos factores adicionales que deben ser tenidos en cuenta, especialmente en proyectos de AR, como son variaciones de la tasa de recarga dentro del acuífero atribuibles a cambios de la permeabilidad, diferencias topográficas, pendiente de la superficie del terreno, cubierta vegetal, etc. (Healy & Cook, 2002). El método proporciona resultados más fiables cuanto menor es el periodo de tiempo de respuesta ante precipitaciones esporádicas, etc. (Walker et al, 2002).

Algunos factores que introducen un cierto margen de error son las oscilaciones atribuibles a la eficiencia barométrica (y/o de las mareas), aire retenido en el acuífero, aire atrapado a presión superior a la atmosférica, y, en general, todos los procesos que intervienen en el ya presentado *efecto Lisse* (Krul & Liefwinck, 1946), como son las variaciones de temperatura, congelación del suelo, bombeos incontrolados, variaciones bruscas en acuíferos contiguos en general por fuertes bombeos, etc. (Sophocleous, 2002).

Por todos estos factores, el WTF puede ser considerado el método más apropiado para cuantificar las oscilaciones del nivel freático como consecuencia de la recarga artificial en la Cubeta de Santiuste, si bien presenta factores enfrentados que reducen su fiabilidad (comentados en el párrafo anterior), aunque aportan información adecuada para el estudio de su prevención.

Aplicando la técnica del WTF (volumétrico algebraico) se ha calculado una variación en el almacenamiento para el mismo periodo de 3,006 hm³/año. De acuerdo con los métodos planteados, en la superficie de infiltración de la *Cubeta*, planimetrada por afloramientos permeables (41,102 km²), se ha infiltrado una cantidad de agua por AR entre 1,623 y 2,073 hm³/año (inicio del Apto. 10.2) siempre considerando el año hidrológico 2002/03. **La infiltración natural oscilaría por tanto entre 0,93 y 1,38 hm³/año.**

La diferencia volumétrica entre la primera medición de la red, tras el inicio de las operaciones de recarga artificial (23 de diciembre de 2002), y la situación de máximo almacenamiento registrado (24 de marzo de 2003), oscila en torno a 2,121 hm³ para el acuífero oeste (28,687 km²). De ellos, el volumen procedente de la AR oscila entre 0,933 y 1,344 hm³ para este sector, en el se ha almacenado la mayoría del agua de recarga. La infiltración natural podría alcanzar los 1,18 hm³.

La cota media del nivel del agua en septiembre de 2002 era de 778,20 m, mientras que en febrero de 2003 era de 785,05 m, lo que representa un rango de variabilidad de 6,85 m. Para evaluar la variación del almacenamiento sería preciso conocer con máximo detalle la morfología de la *Cubeta* con objeto de poder calcular la variación de zona saturada con precisión. Este hecho representa el principal inconveniente del método WTF aritmético estadístico, si bien se perfila como una metodología idónea para estudios de la “profundidad de alerta” o profundidad máxima del nivel freático a partir de la cual la recarga artificial conlleva riesgo de inundaciones.

10. RECARGA ARTIFICIAL EN LA CUBETA DE SANTIUSTE

Esta sección pretende recopilar la información relativa al primer ciclo de AR en la *Cubeta* y obtener una serie de datos que permitan mejorar el conocimiento hidrogeológico del sistema y diseñar conclusiones prácticas extrapolables a escenarios análogos.

La unidad ha sido desglosada en los siguientes puntos:

- **Descripción del dispositivo de AR.** Descripción técnica y análisis crítico.
- **Establecimiento de una Red de Control de la Recarga (RCR)** específica.
- **Memoria de la recarga artificial (AR) durante el año hidrológico 2002/03.** Recopilación de la información relativa a caudales derivados y su distribución, al no haber contado la instalación con caudalímetro en el primer ciclo de recarga artificial.
- **Evaluación de la recarga artificial (AR) para el año hidrológico 2002/03.** Cálculo del volumen infiltrado y de la efectividad del dispositivos. Para ello se ha optado por la técnica del WTF. También es preciso disociar la fracción del volumen infiltrado procedente de recarga natural y artificial.
- **Información derivada del estudio del avance del bulbo de humidificación:** Morfología y funcionamiento del acuífero a partir de la información derivada del estudio del avance del bulbo de humidificación.

10.1. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO

A continuación se presenta una descripción técnica del dispositivo de recarga artificial originario (*MAPA, 1990 y Fdez. Escalante & López, 2002b*), complementada con datos obtenidos en campo durante el primer ciclo de recarga artificial (AR).

La estructura de recarga artificial superficial consta de tres elementos principales: azud y obra de toma, conducciones y obra de recarga artificial.

El azud y obra de toma consta de tres elementos principales dispuestos en el cauce de la margen izquierda del río Voltoya, que son un vertedero con compuertas, una pared de retención de flotantes y una rejilla para minimizar los sólidos en suspensión. En principio se considerará que la rejilla está obstruida cuando lo esté en un 50% de su superficie:

La toma de aguas del río Voltoya se realiza a través de una pequeña presa. La derivación se lleva a cabo desde el punto de coordenadas UTM (1), desde una cota de 817 m sobre el nivel del mar. El agua es conducida por gravedad hasta una estación de transferencia, emplazada a 814 msnm, donde comienza el trazado de una tubería de conducción de 10 km de longitud.

La conducción consta de cuatro elementos principales:

- Dispositivo de disipación de energía (conducción de fibrocemento 1000 B).



- Estructuras metálicas (piezas transversales y vigas de sujeción, con sus correspondientes estribos y zapatas.
- Desagües dispuestos en todos los puntos bajos de la conducción, en número total de 10 unidades constituidos por una tubería de fibrocemento de 250 mm, con una válvula de compuerta alojada en una arqueta de hormigón de 1,0 x 1,0 m².
- Chimeneas de aireación dispuestas en todos los puntos altos de la conducción siguiendo la recomendación de separación entre 500 y 1000 m con pendiente uniforme, evitando que la rasante de la tubería pase por tramos de pendiente nula, con el fin de facilitar la evacuación del aire. Se han realizado dos tipos de chimeneas de aireación: de 300 mm de diámetro para todos los casos, y de 1000 mm para los puntos altos con secciones de control por cambio de régimen.

La conducción finaliza en un depósito de hormigón de 36 m³ de capacidad en la cabecera del caz de recarga artificial, en el punto de coordenadas UTM (2).

El caz de recarga artificial consiste en una excavación de 10.667 m de longitud, coincidente en un 20% con el antiguo cauce del arroyo de la Ermita y discurre por sus terrazas o llanuras de inundación, buscando siempre la pendiente, entre las cotas 714 y 684 msnm, salvando una diferencia de 30 m. Por tanto, su gradiente es de 0,028‰.

El caz tiene una sección de 1,5 m de altura, 1 m de anchura en la base y pendientes 1/1 a ambos lados. La altura media del agua a lo largo del dispositivo oscila entre 50 y 100 cm, con un nivel medio de 80 cm, lo que representa un nivel de la cresta del bulbo de humidificación de 120 cm bajo la cota del nivel medio del terreno (e.a. n.m.t.). Funcionando el caz en régimen permanente, la superficie de infiltración efectiva equivalente (considerando el fondo y las paredes) es de 33.300 m².

Presenta intercalados 64 dispositivos de parada consistentes en compuertas de hormigón con posibilidad de desplazamiento en la vertical, que minimizan la velocidad de las aguas para favorecer la infiltración y favorecer los procesos de decantación. Estos han sido construidas con cuatro módulos prefabricados de 2 x 1,5 x 1 m sobre solera de hormigón H-125. Dos de ellos son abiertos con tajadera de 2 x 1 m (parada) y los otros dos son cerrados, sirviendo de pasarela de manipulación y protección contra la erosión de la lámina vertiente. Su posición se presenta en la cartografía 2.52.

De acuerdo con su diseño preliminar, el nivel estático en el calado en cabecera de cada tramo entre dos paradas consecutivas debe oscilar en torno a 0,5 m bajo el nmt.

En los cruces con caminos y accesos a fincas se han construido 30 obras de paso, que constan de ocho módulos cerrados de hormigón, colocados sobre solera de hormigón armado y con una capa de aglomerado en frío de 5 cm en la losa superior de regularización y tapajuntas. La anchura total del paso es de 4 m, lo que se ha constatado que resulta insuficiente en ángulos de 90 grados para el tránsito de tractores si van provistos de remolque (cubas, etc.).

En los dos puntos de coincidencia de obra de paso y parada se ha construido una obra mixta, que consta de 10 módulos, dos abiertos y ocho cerrados, localizados en el Sanchón y en el cruce con la carretera de Coca a Ciruelos de Coca.

El caz ha sido revestido con 2 m de escollera a ambos lados (gaviones de cuarcitas) en las zonas de transición a las obras de fábrica.

Se ha construido además un camino de servicio paralelo, distante 4 m del caz, compuesto de capa de rodadura sobre tierra y elevado 50 cm sobre la cota del terreno, para facilitar las operaciones de mantenimiento y servir de barrera ante posibles inundaciones extraordinarias. Este camino de servicio será condicionante para el diseño de mecanismos de limpieza y mantenimiento (Bloque 5).

El dispositivo cuenta con dos aliviaderos. El primero está ubicado en el Sanchón, en el punto de coordenadas UTM (3), controlado con compuerta de hormigón y válvula. Se trata de la cacera de Betaya, en el sector central, que conecta el pinar del Sanchón con el Molino del Batán, en la margen izquierda del río Voltoya. Esta cacera coincide con el drenaje del sector este de la *Cubeta*, y tiene una orientación acorde con las directrices tectónicas principales, por lo que parece haber funcionado desde el período terciario. Este dispositivo fue empleado como aliviadero durante el primer ciclo de AR desde el 20 de enero al 1 de mayo de 2003, alcanzando las aguas el Molino del Batán a mediados de abril.

Este desfase advierte de la necesidad de crear dispositivos complementarios para aumentar la efectividad de las operaciones de recarga artificial, ya que las operaciones que se llevan a cabo en la *Cubeta* en la actualidad son exclusivamente de carácter superficial, así como operaciones de mantenimiento para conservar su capacidad de infiltración inicial en los dispositivos dentro de lo posible.

El final del caz de recarga artificial en este ciclo estaba situado en el punto (4) de la Tabla 2.34, donde presenta una bifurcación. Por el este existe un segundo aliviadero natural que se dirige hacia las zonas endorreicas del Bodón de Pedro Corbo, al este de Villeguillo, en el sector en el septentrional. Por el norte, el trazado continua a través del cauce del antiguo arroyo de la Ermita, por el lateral del Cordel de Ruta, hasta Villeguillo, localidad que bordea por el este, si bien las aguas no alcanzaron el casco urbano en el primer ciclo de recarga artificial⁶ (Tabla 2.34).

PUNTO	X	Y	Z
PRESA RÍO VOLTOYA (1)	373785	4548534	718
CABECERA CAZ (2)	370024	4557313	714
ALIVIADERO SANCHON (3)	369697	4560321	709
ALIVIADERO C° DE CASTRILLO (4)	368482	4567100	684

Tabla 2.34. Coordenadas UTM de las principales estructuras obtenidas con GPS monofrecuencia.

La superficie de infiltración inicialmente calculada era cercana a 33.300 m², considerando la infiltración por el fondo y por las paredes. El dispositivo fue diseñado para un caudal de derivación del río Voltoya de hasta 8 hm³ por año, con un caudal instantáneo máximo de 1 m³/s. La concesión final de la CHD limita el caudal máximo de derivación a 6 hm³ anuales, condicionado al carácter del año hidrológico. Por tanto, existiendo agua disponible para recargar, el problema presenta un carácter técnico ¿cómo aumentar la

⁶ Las aguas han alcanzado la localidad de Villeguillo a finales de febrero de 2004, en el segundo ciclo de recarga artificial, que comenzó el 20 de noviembre de 2003. En este ciclo estuvieron abiertos ambos aliviaderos como consecuencia de las fuertes e irregulares precipitaciones con un caudal de derivación cercano a 10 l/s en cada uno desde el principio del ciclo.

velocidad de infiltración de agua en el acuífero? En el Bloque 5 se analizan algunas alternativas para aumentar la efectividad de infiltración.

10.2. ESTABLECIMIENTO DE UNA RED DE CONTROL DE LA RECARGA (RCR)

El estudio de la evolución y control del avance del bulbo de humidificación se ha llevado a cabo mediante el seguimiento de una red específica denominada Red de Control de la Recarga (RCR). Se basa en el seguimiento, en períodos distantes aproximadamente 15 días, del nivel del agua en las captaciones más cercanas al caz de recarga artificial (en torno a 200 metros de distancia máxima). De este modo, se ha obtenido información valiosa relativa al avance del bulbo de humidificación. Esto ha permitido tanto avanzar en el conocimiento de la geometría del acuífero como determinar la cantidad de agua infiltrada aplicando metodologías específicas.

Gran parte de los datos proceden de los trabajos de seguimiento realizados por el MAPA (*en MAPA, 2003*), mientras que otras determinaciones han sido tomadas en el desarrollo de este trabajo de investigación.

La RCR supone una modificación de la diseñada por el MAPA para el control del acuífero (*en MAPA, 2003*) y está integrada por 38 puntos distribuidos bilateralmente a ambos lados del caz de recarga, cuyo listado y mediciones se presentan en el anexo 2.7.2.

La medición de la RCR se llevó a cabo de forma presencial por el MAPA, siendo preciso llevar a cabo mediciones adicionales por parte del autor. Las campañas de campo se llevaron a cabo en las fechas 24-sep-02, 23-dic-02, 13-ene-03, 07-feb-03, 20-feb-03, 24-mar-03, 14-abr-03 y 04-jun-03.

La nivelación de los puntos de la red se ha realizado en gabinete. A partir del MDT de un metro de precisión se han calculado las cotas de los puntos de corte de la superficie del terreno con las captaciones (se considera 0,5 m la precisión obtenida y es suficiente para el objetivo perseguido, al haberse realizado determinaciones seriadas en el mismo punto, con especial atención en sus incrementos relativos). Otros puntos contaban con una nivelación previa de precisión centimétrica (aquellos coincidentes con la RCP). La posición de todos los puntos de las redes se presenta en la Fig. 2.52.

10.3. ANÁLISIS DE LA AR EN LA CUBETA DE SANTIUSTE PARA EL AÑO HIDROLÓGICO 2002/03

10.3.1. Memoria de la AR durante el año hidrológico 2002/03

El primer ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste ha sido en el año hidrológico 2002/03, en concreto entre los días 5 de diciembre y 1 de mayo.

La concesión otorgada por la CHD permite derivar del río Voltoya un máximo de 6 hm³ entre los días 1 de octubre y 1 de mayo de cada año en que la disponibilidad hídrica lo permite. Dado el carácter anormalmente húmedo de este año hidrológico, la concesión (revisable anualmente) fue postergada al período mencionado.

La recarga artificial comenzó el 5 diciembre de 2002 a las 12 h. Inicialmente se realizaron pruebas oportunas para comprobar la efectividad de las estructuras y conducciones, y los dispositivos hidráulicos oportunos para evitar el golpe de ariete, etc., con un caudal cercano a 20 l/s. A mediados de diciembre se incrementó el caudal, con frecuentes variaciones de ajuste entre 150 y 600 l/s. El 20 de enero fue abierta la compuerta de desagüe al río Voltoya a través de la cadera de Betaya, en la confluencia del Sanchón, aliviando un caudal variable cercano a 20 l/s. El día 31 enero de 2003 se cerró el dispositivo de entrada por problemas técnicos a las 19:00 h (inundaciones en la zona del Corbazo, en Ciruelos de Coca, acompañado de fuertes precipitaciones), reiniciándose el 3 febrero de 2003, a las 12:00 h. El 6 de febrero de 2003 fue disminuido el caudal de entrada. El día 6 abril de 2003 fue habilitado un nuevo desagüe del caz por el antiguo cauce del camino de los Torrecillos, en el paraje de la Vaquiña, ya en el término municipal de Villeguillo. El 1 de mayo de 2003 se cerró el dispositivo de entrada a las 15 h.

El dispositivo estuvo funcionando, por tanto, durante 148 días, con tres días de parada, lo que representa un total de 3.490 horas.

El caudal instantáneo derivado fue controlado por la comunidad de regantes y la CHD, y oscilaba entre 150 y 600 l/s. Los aforos realizados en el caz de recarga artificial desprendieron cifras en torno a 300 y 330 l/s. Posteriormente (año hidrológico 2003/04) fue instalado un caudalímetro con totalizador para el control de los caudales instantáneos. Si consideramos la media (3,9 hm³), el caudal instantáneo medio derivado al caz de AR fue de 310 l/s.

El volumen de agua derivado del río Voltoya en el primer ciclo de recarga artificial no fue controlado con precisión, pero según la información recibida de distintas fuentes (MAPA, CHD y comunidad de regantes) y las estimaciones realizadas, estuvo entre 3,77 y 4,03 hm³ (conviene recordar que fue un año hidrológico especialmente húmedo).

Durante las fechas de control del bulbo de humidificación, fueron georreferenciados los puntos del frente de avance de la lámina de agua en el espacio y en el tiempo, ya que como consecuencia de la infiltración, el bulbo fue prosperando en el espacio hacia el norte de manera progresiva.

En la Tabla 2.35 se presentan las coordenadas junto con su fecha correspondiente, número del día del ciclo en que el frente de agua alcanzaba ese punto y distancia desde la cabecera del dispositivo.

FECHA	X	Y	n.º día	Distancia desde cabecera (m)
05/12/2002	370024	4557318	0	5
10/12/2002	369986	4558367	5	1205
17/12/2002	369550	4561812	12	4796
23/12/2002	369532	4562985	18	6047
13/01/2003	368863	4565812	39	9175
24/03/2003	368651	4566748	109	10187
10/04/2003	368482	4567100	126	10581
01/05/2003	368482	4567100	148	10667

Tabla 2.35. Primer ciclo de recarga artificial 2002/03. Coordenadas de los puntos de alcance del frente de AR en el caz con su fecha correspondiente.

La posición del frente de avance de la lámina de agua se presenta en la cartografía 2.52. La etiqueta corresponde al número de día desde el inicio del primer ciclo de AR.

Tras un primer ciclo de recarga artificial, se ha constatado que la efectividad del dispositivo ha sido menor de la inicialmente prevista. Este hecho parece responder a que parte de su trazado discurre por un sustrato en el que las Facies Cuestas, de muy baja permeabilidad, se encuentran a una profundidad inferior a 3 m, hecho desconocido cuando fue diseñado el trazado. Con los datos disponibles de la reconstrucción del paleorrelieve se ha calculado que la fracción del caz discurre sobre materiales acuíferos de espesor superior a 3 m (tramo que ha sido considerado a efectos operativos “longitud del caz inefectiva”). Se han detectado tres tramos longitudinales. Las coordenadas de los extremos se presentan en la tabla 2.36, de modo que el primer tramo corresponde a los puntos 1 y 2, y así sucesivamente.

En cuanto a la longitud de estos tramos, la medición sobre la cartografía digitalizada desprende los siguientes resultados:

- Longitud total del caz: 10.667 m.
- Longitud del caz inefectiva: 3.027 m (2.134 + 672 + 118 m).
- Longitud del caz efectiva: 7.640 m.

En la Tabla 2.36 se presentan las coordenadas de los extremos de los tramos de infiltración inefectiva a lo largo del caz, y la distancia con respecto a la cabecera del dispositivo de AR. Los tres tramos detectados con muy baja capacidad de infiltración han sido designados SUP. INEF. 1, 2 y 3, de sur a norte respectivamente (Tabla 2.36).

Tramo inefectivo	N	X	Y	Distancia desde cabecera caz
SUP INEF 1	1	369787	4559357	2239
	2	369706	4561419	4373
SUP INEF 2	3	369563	4563484	6582
	4	369544	4564129	7254
SUP INEF 3	5	369065	4565484	8771
	6	368911	4565631	8889

Tabla 2.36. Posición de los tramos de infiltración efectiva a lo largo del caz de recarga, y distancia con respecto a la cabecera. Coordenadas UTM tomadas con GPS monofrecuencia.

El trazado efectivo presenta una capacidad de infiltración variable en el espacio y en el tiempo. De acuerdo con los ensayos de infiltración en canales y balsas realizados en 2003 y 2004, la tasa de infiltración o permeabilidad media a lo largo del ciclo de recarga artificial oscila entre 0,86 y 3 m/día. De acuerdo con los datos bibliográficos, la Kv se estimaba en 3 m/día (IRYDA, 1990; MAPA, 1999a). Según otras fuentes, oscila entre 6 y 10 m/día (MOPTMA, 1994).

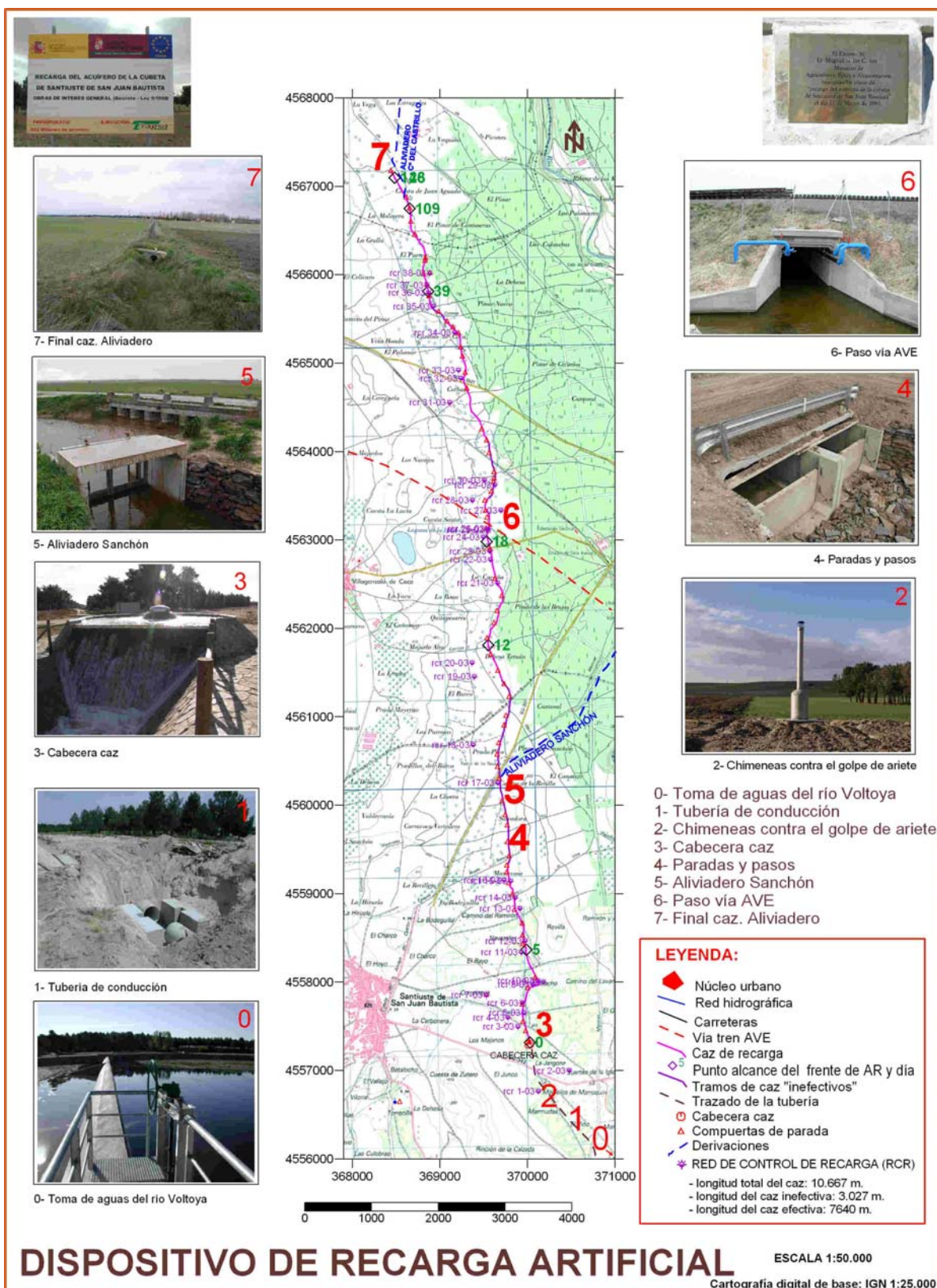
Tal disparidad de datos introduce la necesidad de contar con medidas realizadas en ensayos con una duración no inferior a un ciclo anual.

Además, debe ser tenido en cuenta que la tasa de infiltración disminuirá progresivamente por efecto de la colmatación. En general ya se aprecia una disminución de la tasa de infiltración y, por tanto, de la efectividad de la estructura entre el primer ciclo de recarga artificial y el segundo, lo que ha generado una rápida respuesta por parte del MAPA para la realización de obras complementarias a partir de marzo de 2004.

El presupuesto destinado para estudios y proyectos en la última etapa (declarada obra de interés general por el Decreto Ley 9/1998) ha ascendido a 374.000 €, independientemente del coste de los estudios previos promovidos por la Junta de Castilla y León y por el gobierno central (*Fdez. Escalante & López, 2002b*).

En la Fig. 2.52 aparecen representados los siguientes elementos: trazado del caz de recarga artificial, principales dispositivos implicados [estructura de derivación (fuera de la cartografía), trazado de la tubería enterrada, caz de recarga artificial, paradas, pasos y aliviaderos]. También se representan los tramos designados “inefectivos” por encontrarse las Facies Cuestas a menos de 3 m de profundidad, la posición de los puntos de la RCR, y la posición y fecha del frente de avance de la lámina de agua por el caz durante el primer ciclo de AR. Como mapa de base se ha empleado la cartografía a escala 1:25.000.

Fig. 2.52. Diseño y principales estructuras del caz de AR. (Página siguiente).





10.3.2. Evaluación de la recarga en el año hidrológico 2002/03

La recarga del acuífero se ha calculado bajo las siguientes hipótesis y condiciones de partida:

- El acuífero recibe su alimentación exclusivamente de la infiltración directa del agua de lluvia, de la percolación de parte de las escorrentías superficiales y de la recarga artificial.
- Las transferencias subterráneas entre acuíferos son de muy escasa cuantía.
- Los cauces fluviales principales son efluentes o conservativos, mientras que el arroyo de la Ermita tiene un comportamiento influente.
- El acuífero tiene una respuesta inmediata a las precipitaciones, dada su alta permeabilidad; por tanto, la recarga debe ser evaluada confrontada con el yetograma del año hidrológico.

El procedimiento elegido para la evaluación de la infiltración ha sido el WTF, basado en las fluctuaciones del nivel del agua entre unas fechas determinadas. Esta elección se fundamenta, esencialmente, en la disponibilidad de datos y en la topografía del terreno, de pendiente muy baja, si bien cabría emplear otras metodologías en situaciones análogas.

El seguimiento del potencial hídrico de la RCR ha permitido conocer la evolución seriada del bulbo de humidificación a lo largo del periodo de recarga, aportando, por tanto, la mayoría de los datos necesarios. Se han generado mallas para simular la morfología de la capa freática para cada fecha de medida. El tratamiento de estas *grids* posibilita calcular la diferencia de agua almacenada entre dos mediciones sucesivas, mediante operaciones de álgebra de mapas, así como el volumen total.

A partir de las ocho mediciones realizadas en la RCR, dos de ellas de la situación de la capa freática en septiembre de 2002 (fase preoperacional) y junio de 2003 (fase postoperacional), y seis para el período sinoperacional, junto con la información presentada en los apartados restantes, se pretende deducir el volumen de agua infiltrado al acuífero en el primer ciclo de recarga artificial. Este volumen posiblemente sea la máxima capacidad de infiltración del dispositivo actual, dado que los procesos colmatantes han comenzado actuar en este período.

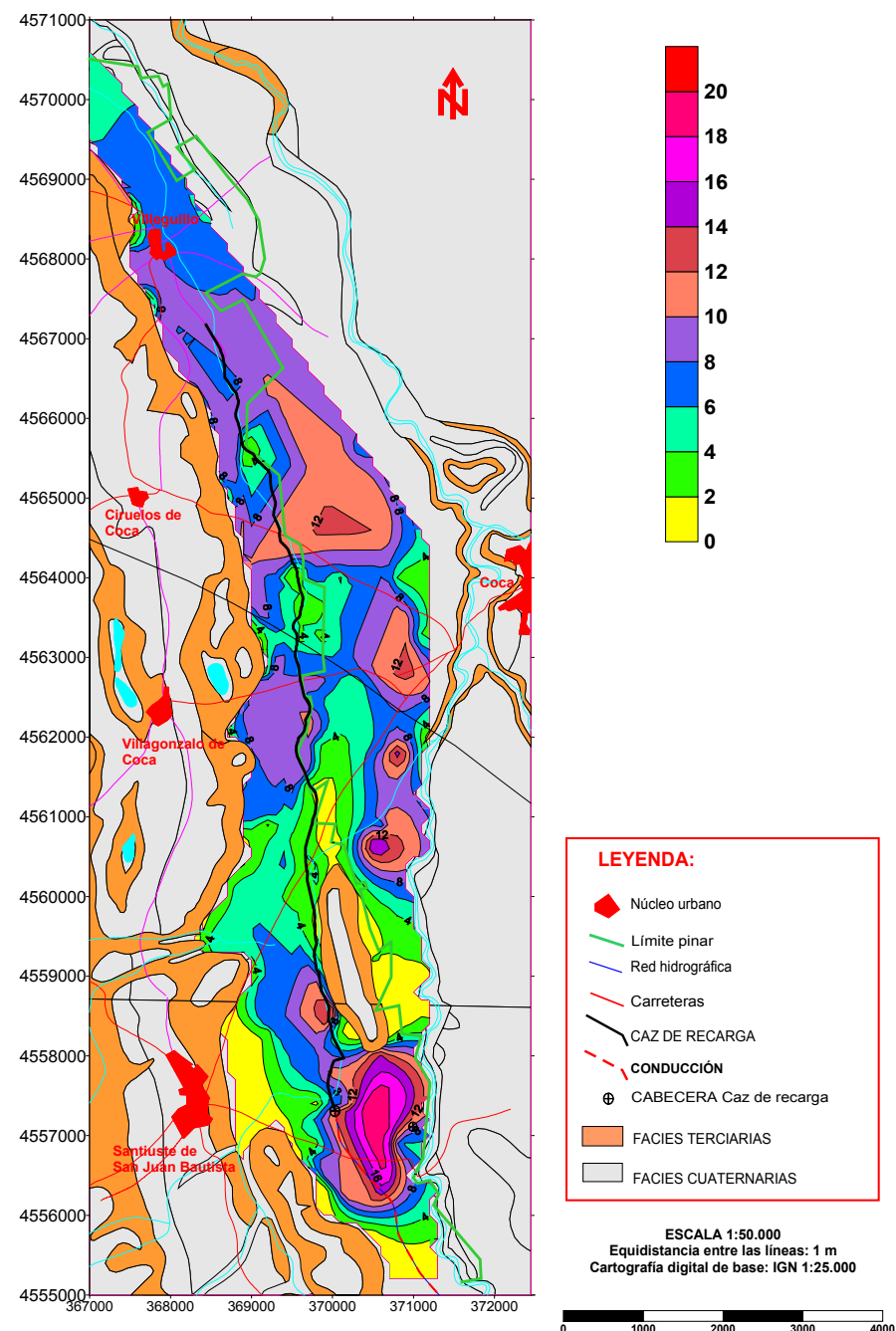
En la fecha del inicio del ciclo, septiembre de 2002, el acuífero presenta un déficit hídrico inferior al que presentaba en 1990 y 1999, por motivos que se describen en el Aptdo. 9.1.1.

Para conocer la fracción de acuífero susceptible de ser recargado, se ha realizado un cálculo de la distribución y espesor de la ZNS mediante operaciones de álgebra de mapas, a partir de las mallas correspondientes a la superficie topográfica, el techo del acuitardo y la capa freática para la situación de septiembre de 2002 (Fig. 2.53).

Fig. 2.53. Mapa de isoespesores de la ZNS en septiembre de 2002 (aguas bajas).







**MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA ZNS
SEPTIEMBRE DE 2002 (AGUAS BAJAS)**



10.3.3. Propuesta y análisis de modalidades de estimación de la recarga a partir de la Técnica de la fluctuación del nivel del agua (WTF)

El grado de cumplimiento del objetivo prefijado, introducir la mayor cantidad de agua en el acuífero manteniendo un nivel de seguridad (o profundidad de alerta) con objeto de incrementar el almacenamiento para la época de riego, ha sido bastante alto, según la apreciación de los regantes. La evaluación del mismo se ha realizado mediante la técnica de la fluctuación del nivel del agua “WTF”.

Esta técnica presenta una serie de ventajas, tales como asegurar que las fluctuaciones en el nivel freático son principalmente efecto de la recarga, al permitir un tiempo para la salida de una fracción del aire entrampado en los sedimentos (*Bouwer, 2002*). Además, minimiza errores motivados por procesos adjuntos, tales como cambios en la eficiencia barométrica, evapotranspiración, etc. El empleo del método requiere conocer el grado de humedad de los sedimentos y el tiempo que transcurre entre movimientos ascendentes y descendentes del ZFP. También es preciso conocer la capacidad específica (S_y) y de la tasa de recarga, parámetro que es dependiente de la duración del ensayo. En general, los valores de S_y son más altos cuanto más duración tiene el experimento (*Bouwer, 2002*).

El método para estimar la recarga neta entre las sucesivas mediciones de la RCR se basa en el empleo de programas de cartografía automática (*Christen, 2000*). En este caso, se ha optado por el programa informático *Surfer 8.0*.

Para su determinación se han seguido dos procedimientos diferentes y elegido el de resultados más veraces tras un análisis de errores. Estos métodos, no recogidos en los antecedentes, han sido designados el método volumétrico algebraico (VA) y el volumétrico estadístico (VE). Ambos parten de la generación de mallas o grids para las superficies freáticas correspondientes a cada fecha de medición de la RCP o RCR, si bien el tratamiento de cada malla es diferente.

El primer procedimiento (volumétrico algebraico) ha consistido en calcular diferencias volumétricas entre las superficies freáticas para el período de estudio, mediante operaciones de álgebra de mapas (módulo *grid-math* y *volume* de *Surfer 8.0*). Calculado el volumen de suelo resultante de la diferencia de dos mallas sucesivas en el tiempo, se ha multiplicado por la porosidad eficaz ponderada, obteniendo así el volumen de agua subterránea almacenada.

El segundo método (volumétrico-estadístico), se ha basado en la determinación de la cota media del nivel del agua mediante el tratamiento estadístico de los datos de la cota del nivel freático en cada fecha de medición.

Estos datos no son la media geométrica de las medidas realizadas en los puntos de agua medidos, sino la media aritmética de todos los nodos de la malla generada con los datos de campo en cada fecha de medición.

El inconveniente del método reside en que la superficie efectiva (planimetrada en superficie) varía de unas cotas a otras, dado que la morfología del sustrato consiste en

varias cubetas irregulares. Por tanto, el volumen no puede ser calculado multiplicando la diferencia de cotas por la superficie efectiva de infiltración.

Los cálculos del volumen entre niveles medios de la superficie freática corresponden al volumen de suelo que se satura o desatura. Puede ser calculado restando a la cota media del nivel del agua el techo del acuitardo terciario, o, lo que es lo mismo, el muro del acuífero arenoso mixto (eólico-fluvial-lagunar). De este modo, se obtiene una serie de volúmenes correspondientes al volumen saturado de acuífero. Cada uno de estos volúmenes, al ser multiplicado por la porosidad eficaz o coeficiente de almacenamiento, proporcionará los datos relativos al volumen consecutivo de recarga total, es decir, la variación en el almacenamiento.

De esta forma se pretende minimizar el margen de error inherente al uso de interpoladores automáticos y el desfase existente entre sus cálculos cuando el número de datos de partida son diferentes (puntos de agua de la red sin medida por impedimentos técnicos u operativos).

Ambos métodos se presentan, de forma didáctica, en las Figs. 2.54 a) y b).

El método que hemos denominado volumétrico algebraico (VA) registra diferencias en el volumen almacenado en el acuífero mediante variaciones de la capa freática. En la primera figura aparece un perfil transversal del sector septentrional de la *Cubeta*. En el lado oeste hay abundancia de cultivos, mientras que en el este hay pinares. El caz de recarga artificial atraviesa el sector occidental cerca del umbral de separación con el oriental. El nivel freático al inicio del ciclo ha sido designado “1”.

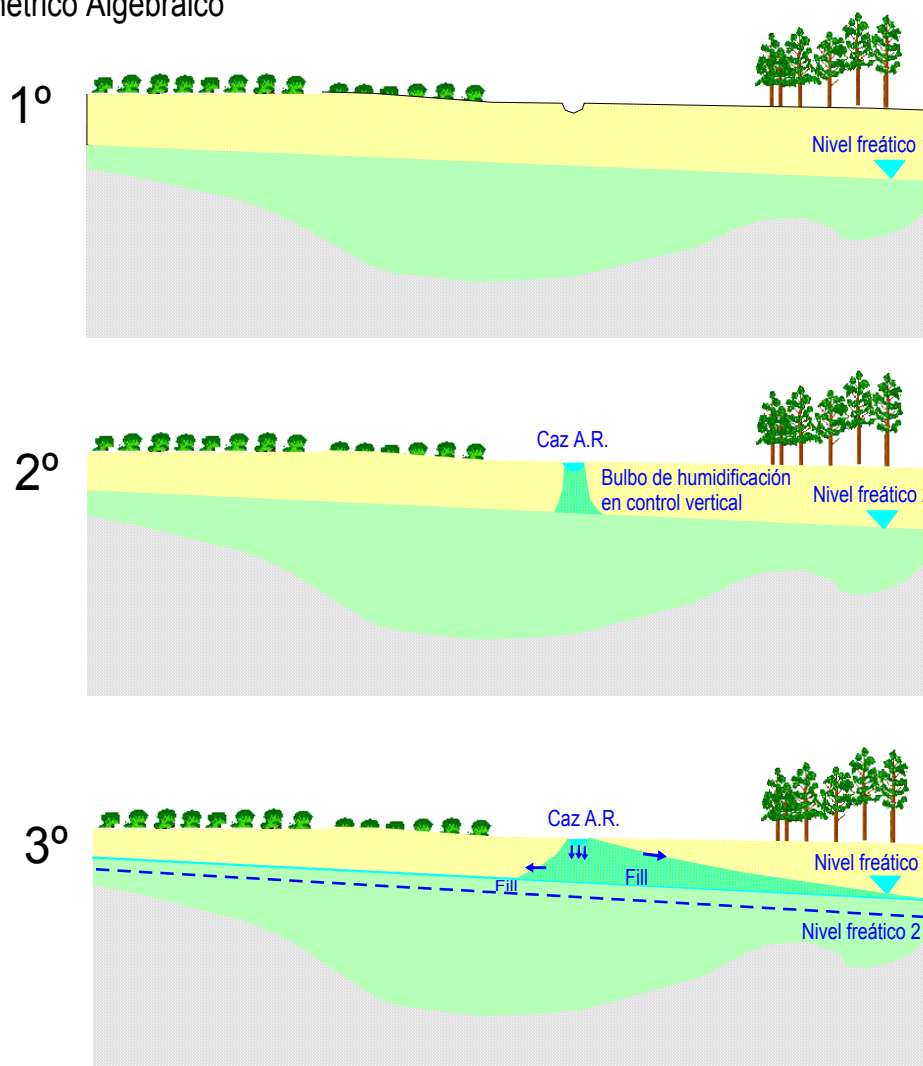
En la segunda figura han comenzado las actuaciones de recarga artificial a través del caz. El bulbo de humidificación prospera en la vertical, hasta que el agua alcanza el nivel freático, entrando en “control vertical”. Se inicia un ascenso de la capa freática (correspondiente al nivel freático 2) en régimen afectado o influenciado (el ascenso es diferencial en distintos puntos de la *Cubeta*). Al volumen de agua infiltrada mediante operaciones de AR hay que añadir la procedente de la infiltración natural.

En la tercera figura, el bulbo de humidificación ha entrado en control lateral. Presenta una simetría típica del régimen afectado a que ha sido sometido el acuífero. La capa freática presenta una morfología anómala, con gradientes inducidos (correspondiente al nivel freático 3). Por ello no se pueden llevar a cabo cálculos de la variación en el almacenamiento mediante simples operaciones de diferencia de cota del nivel del agua. Los cálculos se realizan mediante operaciones algebraicas, restando mallas elaboradas con datos de la capa freática, obteniendo el resultado de las operaciones de ascenso de la capa freática en determinados puntos (fill) menos los descensos registrados en los nodos en que ha habido un descenso de la capa freática (cut).

Obtenido el sumatorio cut-fill, es calculado el producto de la diferencia volumétrica del acuífero por un coeficiente de almacenamiento ponderado.

MODALIDADES CÁLCULO W.T.F.

V.A. Volumétrico Algebraico



V.E. Volumétrico Estadístico

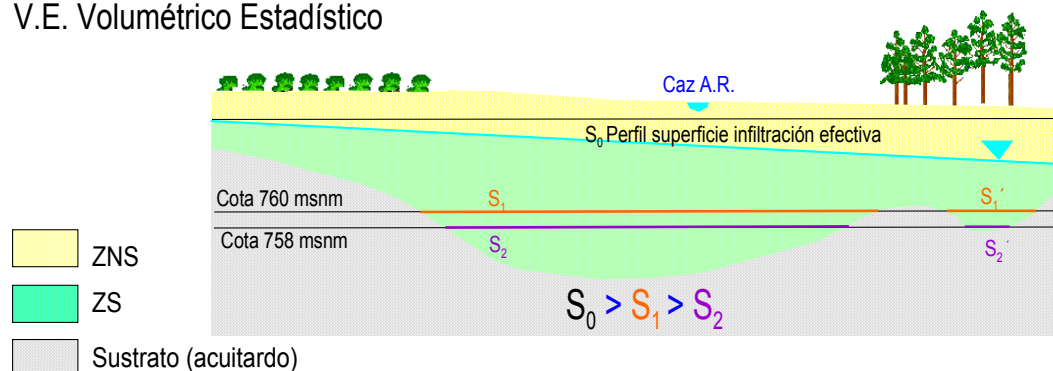


Fig. 2.54. a). Perfil que ejemplifica el método volumétrico-algebraico (VA). La distribución del agua de recarga genera zonas con descensos de niveles (cut) y con relleno de depresiones (fill). El volumen de cálculo considerado es la diferencia entre ambos (cut-fill).

Fig. 2.54. b). Perfil que ejemplifica el método volumétrico-estadístico (VE). De acuerdo con este método, la superficie efectiva es variable para cada cota de infiltración..



El otro procedimiento seguido para el cálculo de la variación en el almacenamiento ha sido designado volumétrico estadístico (VE) y permite contrastar resultados con el anterior. La figura demuestra que, dada la morfología del sustrato, la diferencia del volumen almacenado entre la capa freática S_1 y S_2 no equivale a la diferencia del nivel freático medio por la superficie de infiltración efectiva (S_0), dado que los márgenes son irregulares. Por tanto, el volumen almacenado para la situación de aguas bajas no guarda una relación de proporcionalidad aritmética con los restantes, y el cálculo ha sido realizado mediante las diferencias volumétricas de la zona saturada, es decir, del volumen de agua comprendido entre el basamento (acuitardo) y la capa freática.

Con este sistema se reducen los procedimientos automáticos de interpolación. Al mismo tiempo se pretende estudiar si es factible cubicar la variación del almacenamiento a partir de datos del nivel freático medio en régimen influenciado.

Las cotas medias del nivel del agua se han empleado para elaborar gráficas de infiltración específicas para la zona de estudio en el primer período de recarga artificial (AR), que se presentan al final del apartado.

Aunque ambos métodos parecen similares a priori, los resultados obtenidos varían entre límites relativamente anchos, como consecuencia de los errores inherentes a los interpoladores automáticos, a la irregularidad del sustrato, a la morfología irregular de la capa freática en régimen influenciado y a la heterogeneidad y anisotropía del acuífero.

• Cálculo volumétrico algebraico (WTF VA)

La Tabla 2.37 corresponde a la diferencia volumétrica entre las sucesivas mediciones de la capa freática y el cálculo del volumen de agua involucrado para el sector occidental de la *Cubeta*, de acuerdo con los datos del control de la RCR.

- Δ **FECHA A.H. 02/03**: Fechas correspondientes a las mallas generadas con los datos de las sucesivas campañas de medición.
- Δ **Vol. Suelo**: Resultado de las operaciones de álgebra de mapas de diferencia entre las mallas consecutivas en hm^3 .
- **Vol agua**: Volumen de agua para cada intervalo considerando un coeficiente de almacenamiento del 10 %.
- Δ **Vol. desde inicio ciclo**: Resultado de las operaciones de álgebra de mapas de diferencia entre las mallas generadas en cada fecha y la del inicio del año hidrológico, correspondiente a septiembre de 2002 en m^3 .
- **Variación relativa**: Incremento de volumen de la ZS con respecto al inicio del año hidrológico, en m^3 .

La diferencia volumétrica entre el final del ciclo de recarga artificial y el inicio para la totalidad de la *Cubeta* (sectores occidental y oriental), calculada a partir de las mallas generadas con los datos obtenidos en la RCP se presenta en la Tabla 2.38.

El resultado global para el sumatorio de los incrementos entre el 23 de diciembre de 2002 (primera medición de la red tras el inicio de las operaciones de recarga artificial), y el 24 de marzo de 2003 (situación de máximo almacenamiento registrado),

asciende a **1,344 hm³** (resultante del sumatorio de las filas 1 a 5 de la columna de incremento del volumen de agua almacenado) para la zona de influencia del bulbo de humidificación dentro del sector oeste.

Δ FECHA A.H. 02/03	Δ Vol. Suelo (hm ³)	Vol agua (hm ³)	Δ Vol. desde inicio ciclo (hm ³)	Variación relativa
23 dic-24 sep 02	12,104572	1,210	12,104572	
13 ene-23 dic	0,274498	0,027	26,699388	14594816
7 feb-13 ene	0,697537	0,070	26,952123	252735
20 feb-7 feb	0,388967	0,039	34,784762	7832639
24 mar-20 feb	1,584581	0,158	29,763457	-5021305
10 abr-24 mar	-250463	-0,025	38,526268	8762811
04 jun-10 abr	-4,227082	-0,423	32,729186	-5797082
Total jun 03-sep 02	9,211	1,002		20,625
Suma período recarga sep/02-abr/03	13,439	1,344		26,422

Tabla 2.37. Cálculo de volúmenes mediante el método volumétrico algebraico para el área de influencia del bulbo de humidificación en el sector occidental de la Cubeta (7,128 km²).

Δt (A.H. 02/03)	Δ Vol. Suelo (hm ³)	Vol agua (hm ³)	Δ Vol. desde inicio ciclo
04 jun 03-sep 02	32,729186	3,273	
Sep 03-sep 02	30,056512	3,006	3,0056512

Tabla 2.38. Cálculo de volúmenes mediante el método volumétrico para la totalidad de la superficie de infiltración efectiva de la Cubeta (41,1 km²).

El incremento desde el inicio del año hidrológico hasta junio de 2003 para la totalidad de la *Cubeta* (41,1 km²) es de **3,273 hm³**. La diferencia entre las situaciones de inicio del año hidrológico para septiembre de 2003 con respecto a septiembre de 2002 indica la existencia de **3,006 hm³** como volumen almacenado sobre la situación de partida.

De los datos obtenidos, cabe mencionar que hay un descenso relativo entre dos medidas consecutivas, entre el 10 de abril y el 24 de marzo de 2003, con una disminución volumétrica cercana al 0,025 hm³. Esta aparente disminución de volumen de agua almacenada en el sector occidental del acuífero puede ser atribuible a la expansión lateral del bulbo de humidificación, a la desaireación del acuífero o a errores en la toma de datos.

Analizando pormenorizadamente todos los datos obtenidos, se aprecia que hay dos captaciones de la RCR que experimentan un acusado descenso de nivel. Estas son las dos primeras, ubicadas al inicio del caz de recarga artificial en las inmediaciones de la cabecera. Todos los restantes puntos de la RCR experimentaron un ascenso del nivel freático. El análisis detallado de estos puntos indica que responden a un comportamiento diferente:

El primero, RCR-1, se encuentra conectado con una cubeta de gran potencia y capacidad de almacenamiento, situada en la cabecera de las estructuras de recarga artificial y que apenas recibe una aportación de las operaciones de AR. El descenso de

nivel freático en este punto parece haber estado relacionado con un ascenso del nivel de llenado de la cubeta más meridional del sistema.

El segundo punto, RCR-2, se encuentra al este-sureste de la cabecera del caz, y experimenta descensos en la mayoría de las mediciones con respecto a los puntos cercanos al caz. Esto parece estar motivado por la presencia de una barrera o divisoria hidrogeológica entre ambos. Se trataría de un umbral subterráneo que divide los dos sectores principales de la *Cubeta*, que en dirección norte-sur se prolonga desde el afloramiento Cuerno de la Revilla por debajo del manto eólico. Este punto parece estar conectado además con los manantiales y rezumes del río Voltoya a través de una directriz tectónica NE-SO.

Previsiblemente, la variación del almacenamiento es superior, al no haberse medido los caudales para recarga artificial los 19 primeros días y los últimos 17.

• Cálculo volumétrico estadístico (WTF VE)

Empleando el método estadístico de análisis de mallas o grids de la aplicación *Surfer 8.0*, se ha realizado la Tabla 2.39 para los valores del nivel freático máximo, mínimo y la media de los nodos de la malla generada a partir de las mediciones efectuadas, indicando además el día de recarga artificial del ciclo (Tabla 2.39).

	<i>FECHA A.H.</i> <i>02/03</i>	<i>cota ne</i> <i>Máxima</i>	<i>cota ne</i> <i>mínima</i>	<i>cota ne</i> <i>media</i>	<i>Nº día</i> <i>AR</i>
	24/09/2002	794,87	763,98	778,20	-80
INICIO AR	05/12/2002				0
	23/12/2002	799,19	771,99	783,40	19
	13-ene-03	784,66	770,88	784,66	40
	07-feb-03	798,97	772,02	785,04	65
	20-feb-03	798,86	771,57	785,05	78
	24-mar-03	799,23	773,40	785,33	110
	14-abr-03	799,04	773,51	785,45	131
FIN AR	01-may-03				148
	04-jun-03	799,02	771,74	784,04	
	10-oct-03	797,49	766,28	781,88	

Tabla 2.39. Cálculo de volúmenes mediante el método estadístico. Datos de partida.

El tratamiento de los datos anteriores y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.40, cuya estructura es:

- **Fecha A.H. 02/03:** Fecha de medición de la RCR en el año hidrológico 2002/03.
- **Cota media** del nivel freático resultante del cálculo estadístico de la media de los nodos para cada malla y fecha de medición de la RCR.
- $\Delta n.f (m)$: Incremento de nivel estático medio resultante de la diferencia de las mallas generadas con los datos de dos mediciones sucesivas mediante álgebra de mapas, para la fracción de suelo que se satura o desatura entre ambos períodos.
- **Prof med nmt:** Profundidad media de la capa freática con respecto al nivel medio del terreno en la superficie de infiltración efectiva del sector Occidental (cota media del sector = 789,85 msnm).

- $\Delta n.f. a (m)$: Incremento acumulado de la cota media del nivel freático entre dos mediciones sucesivas.
- $Vol Máx. Z.S (m^3)$: Volumen de la zona saturada del acuífero para cada fecha en m^3 .
- $\Delta Vol Máx. (m^3)$: Incremento de volumen de la zona saturada del acuífero para cada fecha en m^3 con respecto al inicio del año hidrológico.
- $Vol agua$: Incremento en el volumen de agua almacenada en el acuífero para cada fecha de medición, aplicando la modalidad V.E. de la técnica del WTF y considerando un coeficiente de almacenamiento del 10 % (en hm^3).
- N° de día del primer ciclo de AR (año hidrológico 2002/03).

	FECHA A.H. 02/03	cota n.e. media	$\Delta n.f$ (m)	Prof media	$\Delta n.f a$ (m)	Vol Máx. Z.S. (m^3)	$\Delta Vol Máx.$ (m^3)	Vol agua (hm^3)	N° día AR
	24/09/2002	778,20	0	11,65	0	296.341.275			-80
INICIO AR	05/12/2002								0
	23/12/2002	783,40	5,2	6,45	5,2	298.067.331	1.726.055	0,17260555	19
	13-ene-03	784,66	1,26	5,19	6,46	302.694.628	6.353.353	0,6353353	40
	07-feb-03	785,04	0,38	4,81	6,84	304.090.162	7.748.887	0,77488871	65
	20-feb-03	785,05	0,01	4,8	6,85	304.126.887	7.785.611	0,77856117	78
	24-mar-03	785,33	0,28	4,52	7,13	306.146.739	9.805.463	0,98054638	110
	14-abr-03	785,45	0,12	4,4	7,25	307.265.349	9.924.073	0,99240738	131
FIN AR	01-may-03								148

Tabla 2.40. Cálculo de volúmenes mediante el método WTF (volumétrico estadístico) para la zona de influencia del bulbo de humidificación del sector occidental del acuífero.

De acuerdo con estos datos, la variación media del nivel freático para el período de recarga artificial, o nivel de oscilación, fue de **2,05 m**.

La variación de almacenamiento en el sector oeste del acuífero asciende a **1 hm^3** para el período de recarga artificial, volumen inferior al calculado por el método anterior (**1,344 hm^3 /año**).

En principio se aprecia un fuerte incremento en el almacenamiento, en gran parte durante el inicio del año hidrológico por recarga natural, tendiendo más tarde a un incremento más paulatino.

• Análisis de los resultados

Con los datos registrados se han elaborado gráficas de dispersión, con objeto de estudiar la relación entre los resultados empíricos. Estas gráficas reflejan variaciones volumétricas y de cambios en la cota del nivel freático (Figs. 2.55 a) a d).

Se ha realizado un diagrama de dispersión con los datos relativos a la variación en el almacenamiento y calculado la ecuación de una curva de tendencia polinómica, que es (Fig 2.55 a).

$$y = -4E-05x^2 + 0,013x + 2.4526$$

$$R^2 = 0,8919$$



De acuerdo con este método, el volumen de agua almacenado teóricamente en el acuífero el primer día del primer ciclo de recarga artificial, es decir, el 5 de diciembre de 2002 (X=1), es de 2,46 hm³.

A partir de este valor calculado el incremento del almacenamiento como consecuencia de las operaciones de AR ascendería a 0,81 hm³ (Fig 2.55 b).

En cuanto a la variación del nivel freático, la ecuación polinómica de la curva es:

$$y = -0,0002x^2 + 0,0441x + 782,99$$

Uno de los principales inconvenientes operativos encontrados es la carencia de datos del nivel freático y del volumen de agua almacenada en el acuífero al inicio del primer ciclo de recarga (5 de diciembre de 2002), lo que dificulta los cálculos posteriores, que deben ser referidos al inicio del año hidrológico. Con objeto de contar con un valor de partida operacional, se ha utilizado la ecuación anterior (en régimen afectado) para calcular el nivel freático medio el primer día del ciclo (en régimen semiafectado). El resultado es **783,03 m** como nivel freático medio más probable en esa fecha.

$$N.E. \text{ medio} = 783,03 \text{ m}$$

Este dato no presenta contradicción alguna con la totalidad de los datos disponibles.

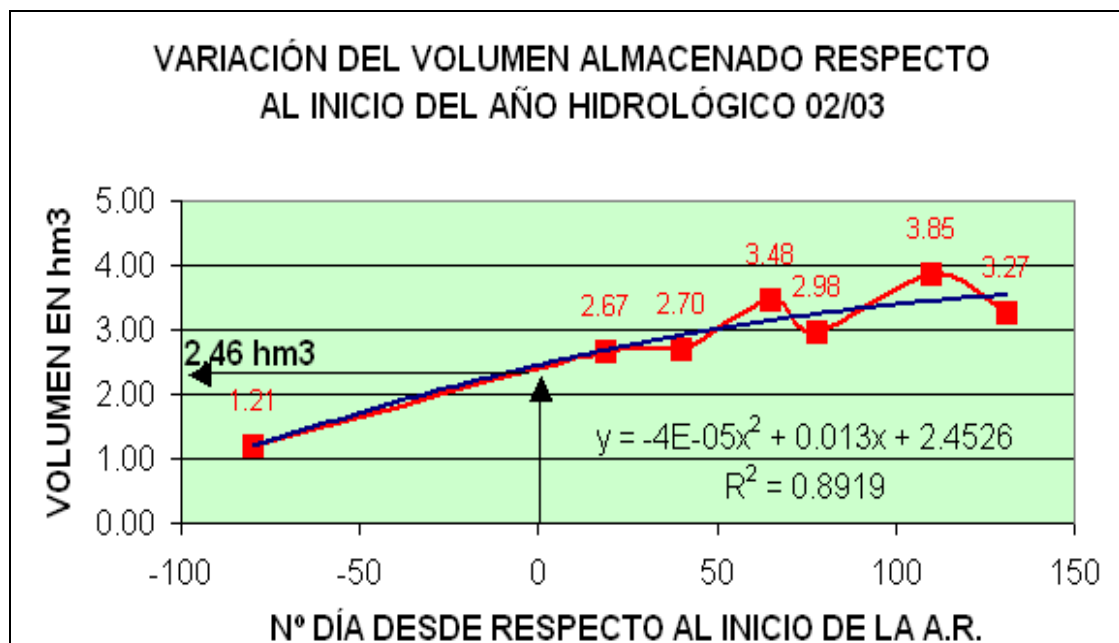


Fig. 2.55 a). Diagrama de dispersión en el que se estudia la variación del incremento del volumen de agua almacenado en el acuífero a lo largo del periodo de recarga con los datos disponibles.

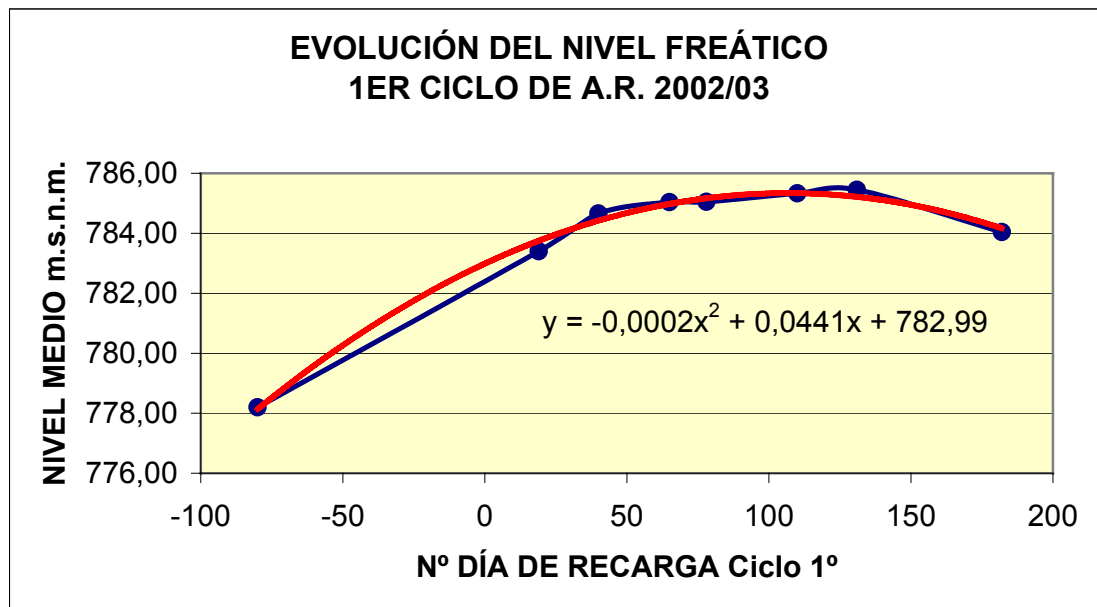


Fig. 2.55 b). Diagrama de dispersión en el que se estudia la variación del nivel freático medio para el sector occidental del acuífero a lo largo del periodo de recarga con los datos disponibles.

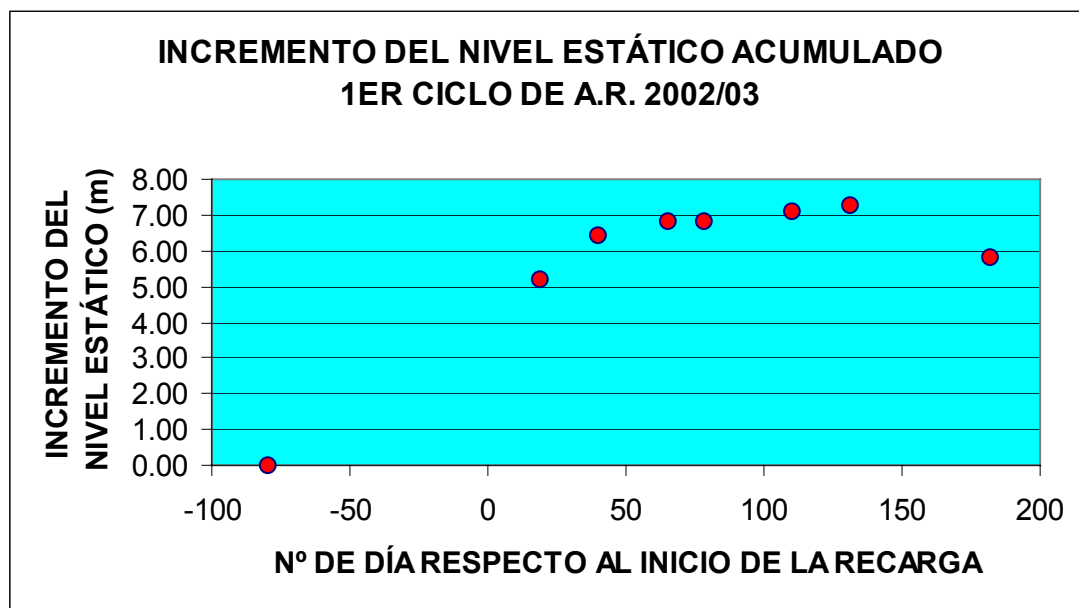


Fig. 2.55 c). Gráfica de incremento del nivel del agua-tiempo para el primer ciclo de recarga artificial (AR) desde el comienzo del año hidrológico (AH). Datos disponibles a lo largo del año hidrológico.

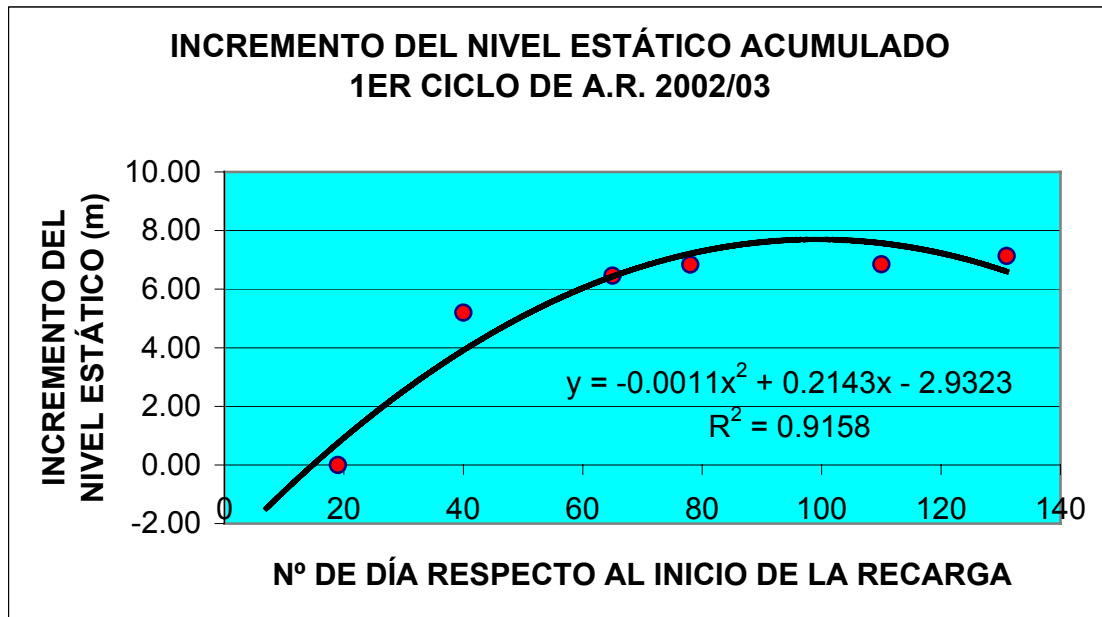


Fig. 2.55 d). Datos disponibles a lo largo del período de recarga. Interpolación de una curva polinómica y cálculo de su ecuación.

Del análisis de los datos se extraen las siguientes observaciones y conclusiones:

- Los datos disponibles proceden de la medición de redes diferentes. En la mayoría de los casos fueron tomados en la RCR, si bien las medidas de septiembre, diciembre y febrero proceden de medidas en la RCP. A tenor de las variaciones entre resultados obtenidos, se detecta una cierta falta de homogeneidad en las medidas, muchas veces inevitables (sondeos tapados o regando durante la visita al campo, captaciones inutilizadas, etc.). A tenor de las observaciones, conviene destacar que es importante realizar las medidas en todos los puntos de la red, y siempre en los mismos puntos o la misma red, lo cual no siempre resulta viable. El principal impedimento es la presencia de puntos de agua secos en las primeras mediciones que, como consecuencia de las operaciones de AR, entran en juego en mediciones posteriores. Por ello, hay algunos datos en puntos de la red de control en blanco en estadios iniciales con datos en las posteriores, lo que disminuye la efectividad de los interpoladores automáticos.
- La serie de datos obtenida presenta una tendencia más o menos regular, homogénea y creciente. Al final del período de AR comienza a adquirir forma asintótica tanto para el volumen almacenado como para la elevación del nivel freático medio.
- Las series de datos presentan ciertas anomalías; por ejemplo, la capacidad de infiltración se ve mermada por efecto de la temperatura y las heladas, así como la entrada de aire en el acuífero (véase el Aptdo. 10.3.5).
- Observando las gráficas de las Figs. 2.55 a) a d), se aprecia que existe un desfase entre el aumento del nivel del agua y la diferencia de volumen no proporcional. De esta manera, con aumentos del nivel freático medio de una magnitud determinada los aumentos de volumen no guardan la misma relación de proporcionalidad, como consecuencia de la morfología del acuífero, su heterogeneidad y anisotropía.

- La aplicación del método del WTF resulta apropiada para el control de la evolución de un acuífero carente de instrumentación instalada de forma permanente, si bien sería importante disponer de datos en determinadas fechas señaladas, como es la forma de la capa freática al inicio y final de las labores de AR. En conclusión: **es conveniente medir la RCR/RCP el primer y el último día del ciclo de AR.**
- La presencia de vacíos y huecos en los datos, muchas veces inevitables por ascender el nivel freático en puntos de agua inicialmente secos, introduce un margen de error en los interpoladores. De ahí la importancia de medir todos y cada uno de los puntos de las redes.
- Se han empleado dos métodos diferentes para el cálculo volumétrico, cuyos resultados presentan una disparidad mayor de la prevista, a pesar de contar con los mismos datos de partida. La variación de almacenamiento en el sector oeste del acuífero asciende a **1 hm³** por el método VE durante el período de recarga artificial, volumen inferior al calculado por el método VA, que es **1,344 hm³/año**. El cálculo del estado inicial mediante la elaboración de gráficas y cálculo de ecuaciones de tendencia aporta valores de variación en el almacenamiento de **0,81 hm³**.
- El empleo del método VE permite minimizar el margen de error inherente al uso de interpoladores automáticos y el desfase existente entre sus cálculos cuando el número de datos de partida son diferentes (puntos de agua de la red sin medida por impedimentos técnicos u operativos). No obstante, requiere un grado de conocimiento del contacto entre el acuífero y el basamento muy bueno, de modo que cuanto mejor sea este conocimiento mejores son los resultados.
- El método VE proporciona resultados apropiados para el cálculo de la “profundidad de alerta”, es decir, la profundidad mínima del nivel del agua que se puede alcanzar sin correr riesgo de inundaciones por ascenso excesivo de la capa freática. Esta medición debe realizarse de manera distribuida, especialmente en las zonas de topografía más agreste. En la zona de estudio, con una pendiente media de 1,015° o 1,2 %, el intervalo de oscilación medio entre la situación de partida y el final del ciclo de recarga artificial es superior a **2,67 m**, para una variación de almacenamiento entre **1 y 1,344 hm³/año** durante el período de AR (excluyendo los períodos sin medidas, que van del 5 al 23 de diciembre de 2002 y del 14 de abril al 1 de mayo de 2003).

Deducida la variación de almacenamiento en la *Cubeta*, es preciso disociar qué fracción procede de recarga natural y cuál de artificial, con objeto de evaluar la efectividad y obtener una tasa de infiltración media del dispositivo para el primer ciclo de AR.

• Cálculo sectorizado de la recarga natural

En el Aptdo. 6.3. fue calculada la infiltración de agua de lluvia y escorrentía para el período comprendido entre 1999 y 2003. En éste la precipitación media fue de 439,1 mm. El cálculo de la infiltración natural oscila entre **8,99 y 11,48%** de la precipitación total a lo largo del período, correspondiente a una cantidad de agua entre **1,623 y 2,073 hm³/año** en la totalidad de la superficie de infiltración de la zona de estudio (41,102 km²). En porcentaje referido a la lluvia útil, la horquilla oscila entre el **66,49 y 84,94%**.



Dado que existen cálculos relativos a la variación en el almacenamiento para ese período, resultantes de aplicar la técnica del WTF VA, se ha calculado una variación en el almacenamiento para el año hidrológico 2002/03 de **3,006 hm³/año**. Teniendo en cuenta que el año hidrológico 2002/03 fue el más húmedo de la serie, con una precipitación total registrada en la estación 2502 de 570,3 mm, cabe esperar que el volumen infiltrado varíe con respecto a la media. Considerando el porcentaje anterior, la cantidad de agua de lluvia infiltrada en la *Cubeta* procedente de la precipitación oscilaría entre 2,12 y 2,70 hm³. No obstante, es posible que el volumen sea ligeramente superior en base a los postulados de Bouwer (*en Bouwer, 2002*), según el cual, la infiltración en acuíferos arenosos detríticos guarda una relación de proporcionalidad directa con la precipitación.

De acuerdo con estos datos, la diferencia de volumen almacenado en el acuífero tras el primer ciclo de recarga artificial menos la infiltración natural (deducida con datos climáticos del cuatrienio 1999-2003) oscila entre **0,933 y 1,383 hm³**, distribuyéndose la práctica totalidad en el sector occidental de la *Cubeta*. Por tanto, el porcentaje de agua procedente de las operaciones de AR oscila entre el **31,04 y 46,01%** de la variación del almacenamiento. Estos porcentajes están referidos a la superficie ocupada por afloramientos permeables, no a la superficie de infiltración efectiva.

La infiltración procedente del agua de lluvia para la totalidad de la zona de estudio oscila entre **1,623 y 2,073 hm³/año**, es decir, del **53,99 al 68,96%**.

La cota media del nivel del agua en septiembre de 2002 era de 778,20 m, mientras que en febrero de 2003 era de 785,05 m (máxima cota media registrada en el primer ciclo de recarga artificial), lo que representa un rango de variabilidad del nivel freático de **6,85 m** en el primer ciclo de AR.

La variación de almacenamiento en el sector oeste del acuífero asciende a **1,344 hm³** para el 1.^{er} ciclo de recarga artificial, según se deduce de la aplicación del método WTF-VA aplicando el método WTF-VE da como resultado una variación cercana a **1 hm³**, lo que representa un alto grado de concordancia entre las cifras de agua infiltrada obtenidas por diferencias volumétricas y cálculos climatológicos.

En el primer ciclo de recarga artificial se ha obtenido una tasa de infiltración total entre **140,29 y 188,55 l/m²** para la zona de influencia del bulbo de humidificación del sector oeste, planimetrada en **7,128 km²**, o bien entre **0,140 y 0,189 m³/año · m²**.

De acuerdo con el cálculo porcentual realizado para el sector oeste de la *Cubeta*, la tasa de infiltración correspondiente a las operaciones de AR oscilarían entre **43,54 y 86,75 l/m²** o bien entre **0,43 y 0,87 m³/año · m²**. De este modo, los valores más altos de la horquilla corresponderían a las zonas de infiltración efectiva del caz de recarga artificial y al área de influencia del bulbo de humidificación, mientras que los más bajos quedarían localizados más alejados de la zona de alcance del bulbo y el las zonas de escaso espesor de la zona no saturada.

Con objeto de afinar en estos cálculos, se ha calculado que fracción de la superficie de afloramientos permeables corresponde a superficie de infiltración efectiva. Para ello se ha analizado la cartografía de isopacas y el registro de variaciones de la cota de la capa freática en el año hidrológico 2002/03.

Los criterios de exclusión de afloramientos permeables que no constituyen superficie de infiltración efectiva son:

- Espesor de arenas menor de 3 metros de profundidad.
- Topografía superficial con fuertes contrastes, de modo que la recarga artificial en un punto puede conducir a la inundación de zonas adyacentes.
- Detección de Facies Cuestas por encima de tres metros de profundidad.
- Presencia de formaciones aluviales cuaternarias con abundancia de arcillas y finos a la misma cota.
- Superficie de oscilación de la capa freática con el nivel superior a menos de 2 metros de la cota media del terreno. Esta distancia ha sido designada “profundidad de alerta” (*Christen et al, 2001*).

Las superficies de infiltración efectiva resultantes han sido calculadas mediante operaciones de álgebra de mapas, y ascienden a:

SECTOR	OCCIDENTAL	ORIENTAL
Superficie afloramientos permeables (km ²)	28,687	12,415
Superficie de infiltración efectiva (km ²)	20,496	7,775
Zona de influencia del bulbo de humidificación (km ²)	7,128	<1

Tabla 2.41. Superficies empleadas para los diferentes cálculos.

10.3.4. Efectividad del primer ciclo de AR e influencia de factores externos

A partir de los datos calculados relativos a la variación del volumen almacenado a lo largo del ciclo de recarga artificial, del tramo de caz inundado y la disociación de la fracción procedente del agua de lluvia y de las operaciones de AR, es posible calcular una tasa de infiltración media para los períodos comprendidos entre las fechas de las sucesivas campañas de campo.

En las tablas 2.42 y 2.43 se presentan los datos precisos para determinar la variación de la tasa de infiltración en el tiempo. La 1ª recoge los datos de variación del volumen y del nivel del agua medio con respecto a los días del 1^{er} ciclo de AR.

Δ Vol. desde inicio ciclo (hm ³)	cota n.e. media	Nº día recarga 1 ^{er} ciclo
	783,03*	1
1,21	783,40	19
1,237	784,66	40
1,307	785,04	65
1,346	785,05	78
1,504	785,33	110
1,479	785,45	131

Tabla 2.42. Variación del volumen de agua almacenada y del nivel freático a lo largo del primer ciclo de recarga artificial con los datos disponibles (Resultados del proceso de cálculo descrito).

Los datos relativos al alcance del frente de agua a lo largo del caz de AR permiten apreciar que el frente avanza con gran rapidez en los tramos de baja capacidad de infiltración (del orden de 50 a 70 m/día), mientras que en tramos de superficie de infiltración efectiva, el frente de avance se propaga más lentamente (del orden de 25 a 40 m/día) (cálculos realizados con los datos obtenidos durante el primer ciclo de recarga artificial, que previsiblemente variarán a medida que varíe el grado de colmatación).

La Tabla 2.43. recoge la información relativa al alcance máximo del frente de agua a lo largo del tiempo, ya que desde el inicio del ciclo hasta que el agua alcanzó el final del dispositivo transcurrieron aproximadamente 110 días (datos de encuestas).

De acuerdo con el avance del frente de recarga artificial (AR) a lo largo del tiempo y del caudal derivado, se puede establecer una relación entre la variación de volumen almacenado, el caudal derivado y la superficie de infiltración efectiva.

Contando con el caudal derivado hasta la fecha, se han calculado tasas de infiltración efectiva en función de la longitud del caz inundada en cada fecha de medición. Estas tasas de infiltración cuentan con el grado de incertidumbre inherente a la entrada de aire en el sistema, la relación directa con las precipitaciones y con los ciclos de helada.

La Tabla 2.43 recoge la siguiente información:

- Fecha.
- X: Coordenada UTM X.
- Y: Coordenada UTM Y.
- N°: Número de día respecto inicio ciclo recarga artificial.
- Sup. Ef: Superficie de infiltración efectiva del caz (son 33.300 m² de superficie de infiltración efectiva equivalente (considerando el fondo y las paredes) en una longitud total del caz de 10.667 m, lo que corresponde, como promedio, a una tasa de **3,12 m²/m.l.**
- Vol: Volumen derivado total hasta la fecha de medida desde el río Voltoya al caz de AR (m³). Se trata de una estimación basada en los datos disponibles.
- T inf: Tasa de infiltración calculada por extrapolación de los datos reales (m³/año · m²).

FECHA	X	Y	n° día	Distancia a cabecera (m)	Sup ef.(m ²)	Vol (m ³)	T inf (m ³ /año · m ²)
5-12-02	370024	4557318	0,5	5	15,6	432	28
10-12-02	369550	4561812	5	1.205	3.759,6	7.776	151
17-12-02	369986	4558367	12	4.796	14.963,52	72.576	148
23-12-02	369532	4562985	18	6.047	18.866,64	301.536	324
13-1-03	368863	4565812	39	9.175	28.626	936.576	306
24-3-03	368651	4566748	109	10.187	31.783,44	2.860.445	301
10-4-03	368482	4567100	126	10.581	33.012,72	3.330.461	292
1-5-03	368482	4567100	148	10.667	33.281,04	3.938.717	292

Tabla 2.43. Posición del frente de avance de la lámina de agua con respecto a la fecha durante el primer ciclo de AR. La distancia a la cabecera corresponde a la distancia entre los puntos de avance a lo largo del caz.

Los datos presentados indican que el frente de avance del agua ha avanzado a una velocidad muy superior en los tramos de caz de infiltración inefectiva que en los días en que ha discurrido sobre afloramientos permeables gruesos y no saturados.

Con los datos tabulados, se han elaborado unas gráficas de gestión hídrica (Figs. 2.56 a) - c).

Con objeto de estudiar la variabilidad espacial de la tasa de infiltración (calculada por extrapolación), se ha elaborado la gráfica 2.56 a), donde constan, en el eje de ordenadas, la tasa de infiltración en $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}$ y en abscisas la distancia a la cabecera del dispositivo de recarga artificial. Se han sombreado los intervalos considerados de infiltración inefectiva.

La ecuación polinomial de la curva de tendencia de esta nube de puntos es:

$$y = -3\text{E-}06x^2 + 0,0504x + 49,036$$

$$R^2 = 0,8304$$

Donde:

- X = distancia a la cabecera del dispositivo a lo largo del canal de recarga artificial.
- Y = Tasa de infiltración efectiva teórica ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}$).

Ecuación correspondiente a una curva parabólica asintótica al final.

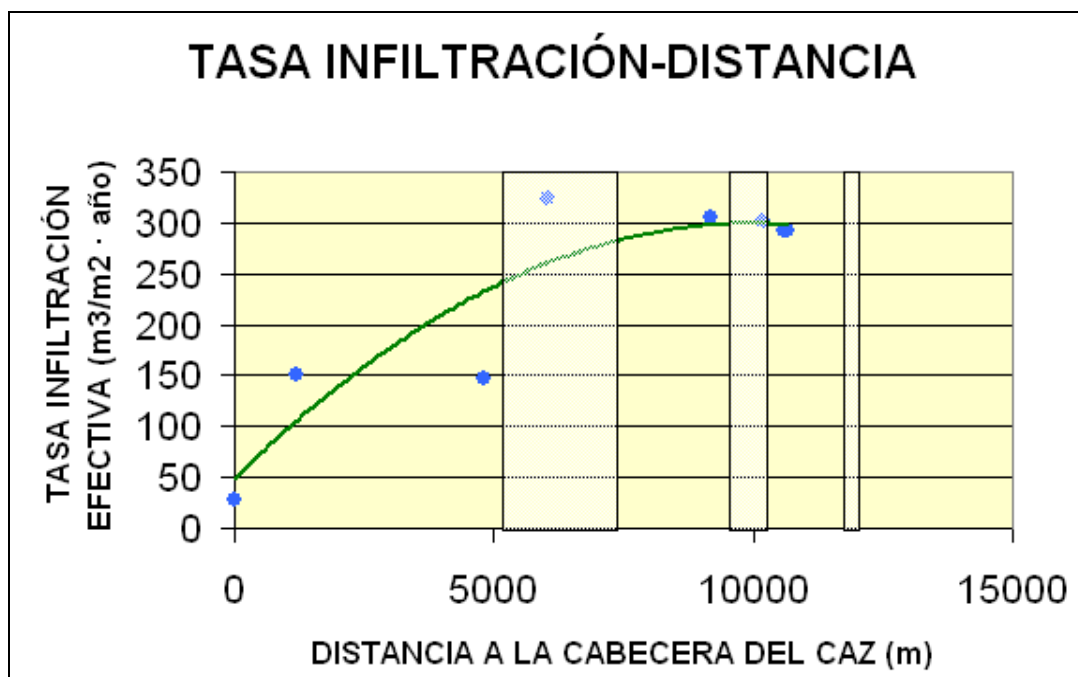


Fig. 2.56 a). Distribución espacial de la tasa de infiltración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}$). La distancia a la cabecera corresponde a la distancia entre los puntos de avance a lo largo del caz. Zonas sombreadas correspondientes a superficies de infiltración inefectivas.

La tasa de infiltración también ha sido tabulada con respecto al tiempo, con objeto de estudiar la variabilidad temporal [Figs. 2.56 a) y b)].

La ecuación parabólica polinomial de la curva de tendencia de esta nube de puntos es:

Escala aritmética:

$$y = -0,0341x^2 + 5,9653x + 109,21$$
$$R_2 = 0,6543$$

Escala logarítmica:

$$y = 49,02 \ln(x) + 80,245$$

Donde:

- Y= tasa de infiltración efectiva teórica ($m^3/m^2 \cdot \text{año}$).
- X = n.º de día del ciclo de recarga artificial.

La tasa de infiltración máxima para 180 días oscilaría entre 140,3 y 334,8 $m^3/m^2 \cdot \text{ciclo de recarga (180 días)}$.

La distribución de la tasa de infiltración está condicionada por numerosos factores. Entre ellos cabe destacar la precipitación atmosférica, la temperatura ambiente (ciclos de heladas) y la entrada de aire en el sistema. A estos hay que añadir las variaciones en las condiciones geoambientales y en la calidad del agua a recargar.

En cuanto a la precipitación atmosférica, existe una relación de proporcionalidad directa entre suelos arenosos y la tasa de recarga, de modo que tal tasa aumenta con la precipitación (*Petheran et al, 2000*).

Para el estudio de esta variable se han recopilado los datos diarios de tipo pluvio de la estación E-2502, Santiuste de San Juan Bautista del IMN, para el AH 2002/03, cuya precipitación total asciende a 570,3 mm.

Con estos se ha generado un yetograma de distribución de precipitaciones en el tiempo, que ha sido confrontado con los datos disponibles de variación del almacenamiento y de cota media del nivel freático en la zona de estudio (Fig. 2.57).

El primer ciclo de recarga artificial, de 148 días de duración, comprende desde el día nº 67 al 214 del año hidrológico. El yetograma para este período se presenta en la Fig. 2.57, diseñada para confrontar las principales variables con influencia en la capacidad de infiltración.

En la Fig. 2.58 se presenta el intervalo temporal para el primer ciclo de recarga artificial, y, de arriba hacia abajo, la gráfica morada corresponde a la evolución del nivel freático medio en el acuífero en msnm (el primer valor es calculado al no disponer de datos para el primer día del ciclo); la roja corresponde a la variación del almacenamiento (en hm^3), en azul la distribución de las precipitaciones durante el ciclo y en cian los días con un valor térmico medio por debajo de cero (en blanco hielo).

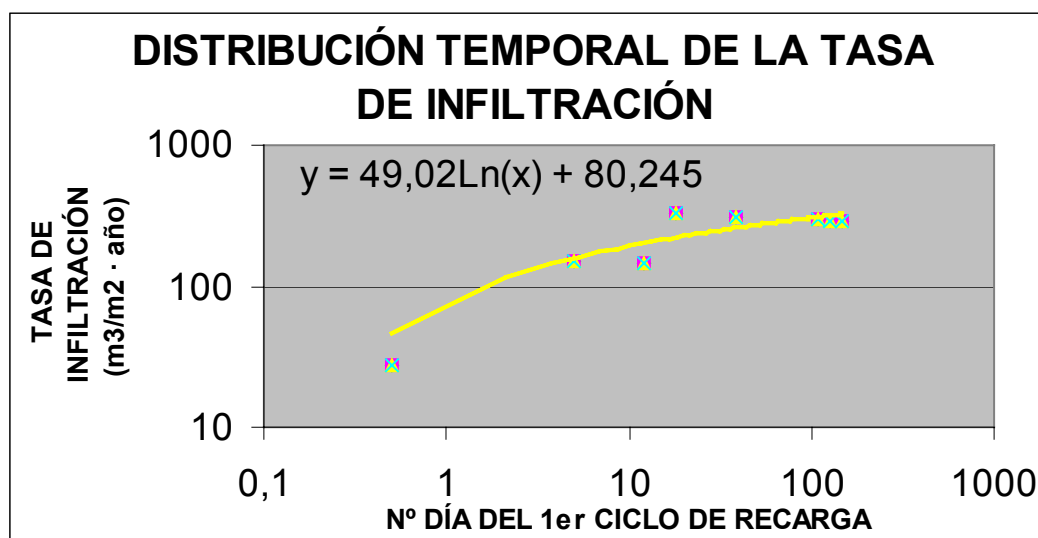
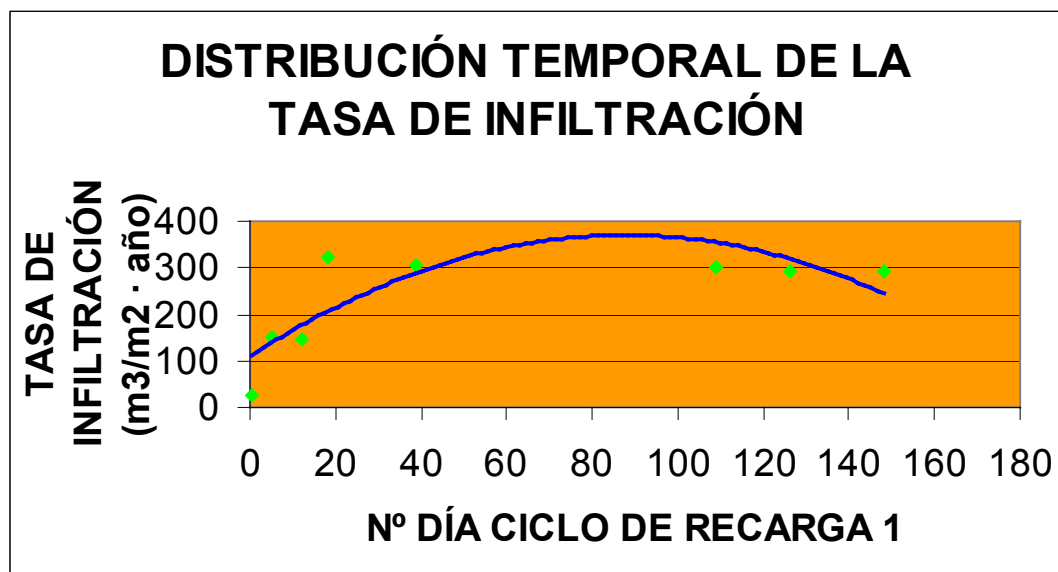


Fig. 2.56. b) y c). Distribución temporal de la tasa de infiltración ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}$). Escalas aritmética y logarítmica.

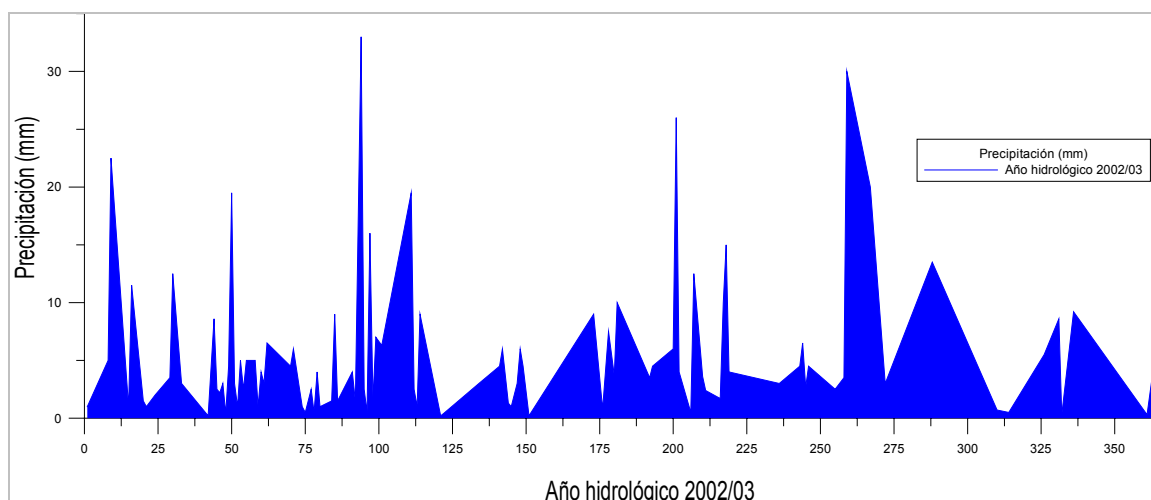


Fig. 2.57. Yetograma para el año hidrológico 2002/03.

En la Fig. 2.59 se presenta una imagen del dispositivo de recarga artificial durante un ciclo de heladas.

Las variaciones bruscas del nivel del agua están condicionadas fuertemente por la precipitación, con un período de retardo de 15 a 20 días, apreciándose ascensos máximos tras períodos de precipitaciones muy altas.

El incremento del volumen almacenado presenta una tendencia creciente con pendiente similar durante los ciclos de heladas, aumentando la pendiente al ascender la temperatura a pesar de no registrarse fuertes precipitaciones en ese período. Al final del ciclo hay un nuevo descenso, posiblemente por desaireación del acuífero.

Las heladas máximas suelen corresponder con períodos sin precipitaciones (10 a 16 de enero, 31 de enero y 1 de febrero y 15 a 18 de febrero de 2003). El incremento en el almacenamiento durante el primer ciclo de heladas se debe al retardo.

Observando los datos termo de la estación 2502 de Santiuste de San Juan Bautista, se aprecia que durante los ciclos de heladas hay un incremento de volumen proporcionalmente inferior al ocurrido en los meses restantes (Tabla 2.43).

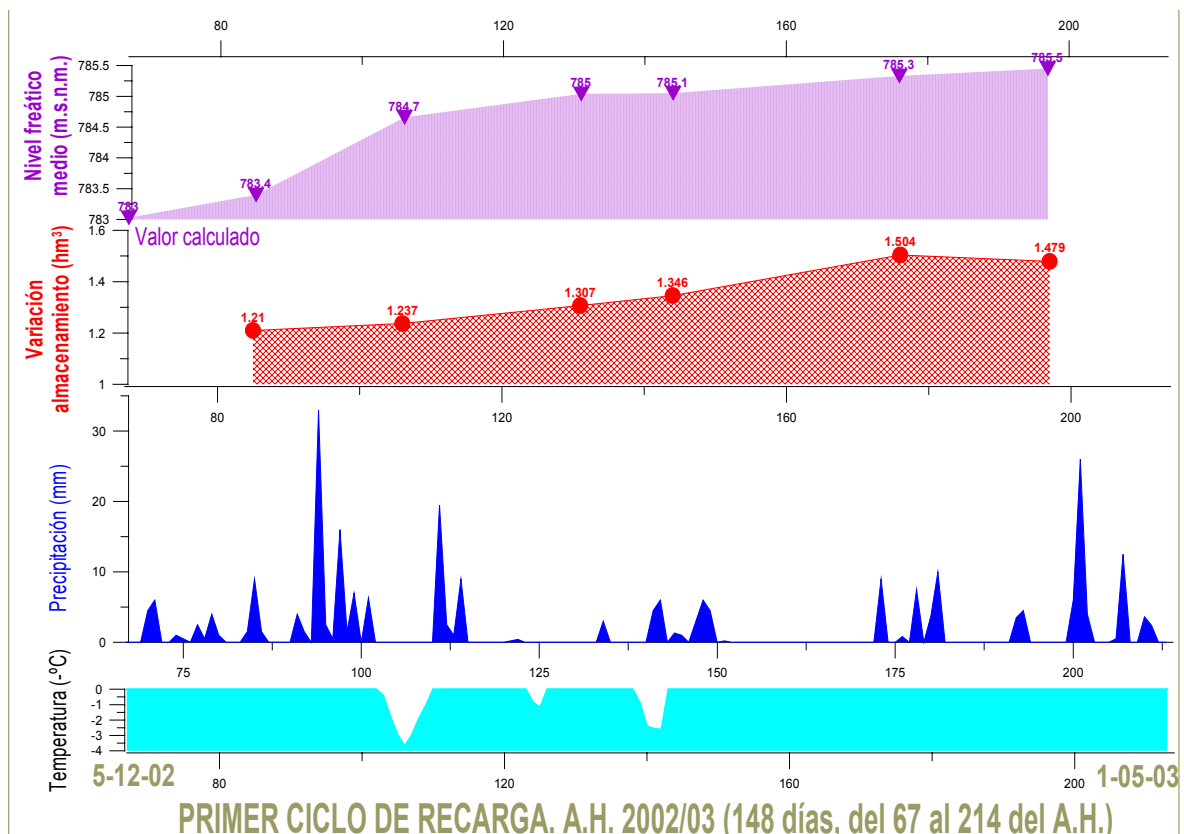


Fig. 2.58. Gráfica con representación de los parámetros: nivel freático medio, incremento en el almacenamiento, yetograma y termograma para ciclos de heladas del primer ciclo de recarga artificial (días 5 de diciembre de 2002 a 1 de mayo de 2003, equivalentes a los días 67 a 214 del año hidrológico).



Fig. 2.59. Aspecto del caz de recarga artificial durante un período de heladas durante varios días consecutivos de enero de 2003.

En la medición del 20 de febrero se aprecia un descenso volumétrico, atribuible a haberse ralentizado la velocidad de infiltración por efecto de las heladas y, posiblemente, incurrir un proceso de desaieración. La temperatura mínima del año hidrológico fue registrada el día 17 de febrero de 2003 (día 75 del ciclo de AR). En el período comprendido entre el 5 y 20 de febrero (días que cuentan con medidas y cálculos del volumen de agua almacenado en el acuífero y su variación), el rango de variabilidad es muy bajo con respecto a la tendencia observada en gráficas y tablas.

Se ha observado también, por contar con datos diarios de temperaturas, la estación de información agroclimática del MAPA nº SG 02 (Navas de Oro), distante unos 7 km del área de estudio (*en <http://www.jcyl.es/inforiego>*). Se han extraído los datos termo correspondientes a los días con Tª media bajo cero del año hidrológico, que aparecen sintetizados en la tabla 2.44. En total hubo 64 días con temperaturas por debajo de cero. De ellos, 13 tuvieron una temperatura media bajo cero. Los períodos de menor temperatura media fueron del 11 al 16 de enero y del 15 al 19 de febrero de 2003. El 17 de febrero se registró la temperatura mínima absoluta y el 13 de enero la menor temperatura media.

Existen mediciones de la red de fecha 13 de enero de 2003 (en pleno primer ciclo de heladas máximas) y de 20 de febrero (al término del segundo). En el primer caso, se aprecia una variación en el almacenamiento)con respecto a la del 23 de diciembre de 2002) mayor que en el segundo ciclo de heladas máximas. Empleando el indicador de la diferencia de la cota media de la capa freática, la diferencia en el primer período es de 126 cm, mientras que en el segundo es de 1 cm. A este respecto conviene mencionar que el período transcurrido entre dos medidas consecutivas fue de 21 días, mientras que el segundo fue de 15 días.

De acuerdo con estos datos, la medición el 20 de febrero de la RCR aporta pruebas indiciales para pensar que la escasa variación en el almacenamiento con respecto a la medida previa, del día 5 de febrero, está influida por el ciclo de heladas y posiblemente por el período de escape del aire entrampado en el acuífero introducido de forma simultánea al agua de recarga artificial en forma de oxígeno y CO₂ disueltos.

Fecha	Tª media	Temp. máx.	Hora Tª máx.	Temp. mín.
13/01/2003	-3,7	3,48	15:10	-9,08
14/01/2003	-2,97	6,57	15:50	-8,87
12/01/2003	-2,95	0,2	15:00	-6,12
18/02/2003	-2,61	3,83	22:00	-9,42
17/02/2003	-2,56	4,95	14:20	-10,29
16/02/2003	-2,4	5,96	14:40	-9,69
15/01/2003	-1,88	6,38	13:00	-7,46
11/01/2003	-1,75	1,67	14:50	-5,45
01/02/2003	-1,18	4,48	14:20	-6,39
16/01/2003	-1,02	7,91	15:30	-6,52
15/02/2003	-0,87	3,82	13:40	-5,92
31/01/2003	-0,85	2,68	0:00	-4,17
10/01/2003	-0,42	1,01	14:40	-2,36

Tabla 2.44. Días con temperatura mínima bajo cero del año hidrológico 2002/03 en la estación agroclimática SG-02 de Navas de Oro (Fuente: Inforiego).

Estas observaciones permiten deducir que al período de heladas se ha simultaneado un período con frecuentes procesos de desaireación.

La **entrada de aire en el sistema** (se trata de un dispositivo de recarga artificial superficial) reduce la capacidad de infiltración, por efecto *Lisse*. Las mediciones de oxígeno disuelto en el agua de recarga artificial varían entre 8 y 11,5 ppm, concentración que duplica los valores medios en las aguas subterráneas del acuífero. De este modo, algunos de los descensos intermedios observados podrían ser atribuibles a procesos de desaireación del acuífero.

Los valores de máximo volumen almacenado corresponden al 24 de marzo, siendo más altos que la medida de abril, tomada 21 días después durante los cuales estuvo operativo el dispositivo de AR. Este intervalo corresponde a un ascenso térmico, lo que podría haber influido en los procesos de desaireación del acuífero.

Las mediciones del nivel freático medio para el 24 de marzo rompen la relación de proporcionalidad con las variaciones de volumen almacenado en el acuífero.

Las variaciones en las **condiciones geoambientales** pueden provocar alteraciones importantes en la capacidad de infiltración, y consecuentemente, en la efectividad de las estructuras de recarga artificial. Un ejemplo habitual en la zona es el aclarado de terrenos para usos agrícolas, construcción de corta-fuegos, etc. y la extracción de raíces profundas perennes, hecho que reduce la capacidad de infiltración y aumenta la escorrentía superficial.

La gráfica 2.60 ilustra este proceso. Las masas boscosas, incluso después de incendiarse, tienen una capacidad de infiltración superior a la de los campos de labor (Petheran *et al*, 2000; Harris, 2002).

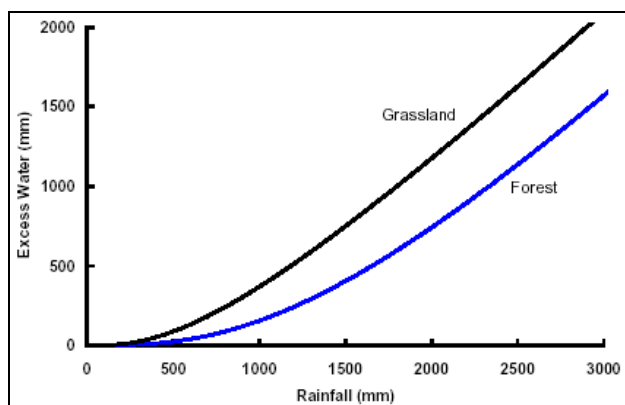


Fig. 2.60. Relación entre el exceso de agua y la cubierta vegetal del terreno (en Petheran *et al*, 2000).

En zonas con alto dinamismo en cuanto a variaciones de usos del suelo es conveniente contar con algún sistema de evaluación del exceso de agua.

Un indicador habitual es el de Zhang (en Zhang *et al*, 1999), empleado para evaluar el “exceso de agua” en suelos arenosos estableciendo una horquilla de valores entre el límite superior de los excesos registrados y la previsión de la variación del exceso o potencialidad al cambio en períodos de más de cinco años (Zhang, 1999; Petheran *et al*, 2000).

Con objeto de contrastar estos resultados con los obtenidos en otros **escenarios análogos**, se ha buscado información específica de experiencias en la Península Ibérica, para que las condiciones de contorno sean lo más parecidas posible.

Se ha recopilado de la bibliografía gráficas estadísticas para estudiar la evolución de la AR en el delta del Llobregat (en Custodio y Llamas, 1983). El tipo de experiencias fue similar, aunque el clima no, de ahí las grandes diferencias que serán presentadas a continuación.

El dispositivo de recarga artificial, designado “caz” en terminología local, podría ser asimilable a una zanja o surco (Custodio y Llamas, 1983) o bien un foso (IGME, 2001), por tanto se rige por los condicionantes de los sistemas de recarga en superficie.

Los valores de infiltración obtenidos por escenarios análogos oscilan entre 0,25 y 2 m/día (Bourguet, 1971, en Custodio y Llamas, 1983). Estos valores fueron obtenidos a partir de relaciones estadísticas, no hidráulicas, entre la permeabilidad horizontal del acuífero con el caudal específico de infiltración.

Las Figs. 2.61. a) y b) relacionan los pares de valores obtenidos empíricamente e interpola una recta de regresión.

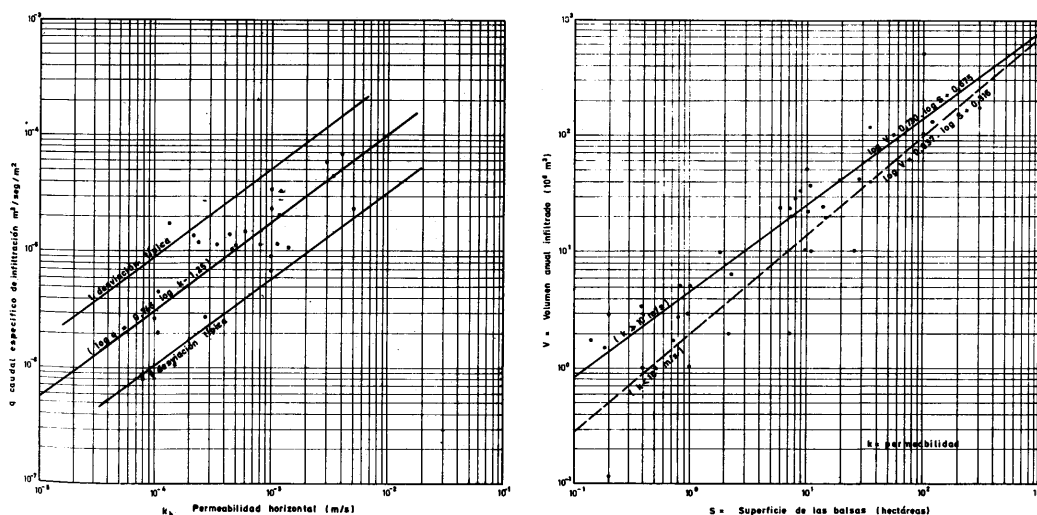


Fig. 2.61. a). Relación entre la permeabilidad horizontal (m/s) frente a caudal específico (m³/s · m²).
Fig. 2.61. b). Relación entre la superficie de las balsas (hectáreas) frente al volumen total anual infiltrado (Tomadas de Custodio y Llamas, 1983).

Estas gráficas representan un ejemplo metodológico de aplicación, que consiste en la elaboración de una gráfica detallada para cada caso específico de acuerdo con las propiedades y tipo de acuífero y de la ZNS. Este tipo de gráficas deben ser referidas a un período específico, al ser variable la capacidad de infiltración como consecuencia de la colmatación. En la misma fuente se representa una gráfica obtenida empíricamente que confronta el caudal de infiltración con el tiempo (Fig. 2.62).

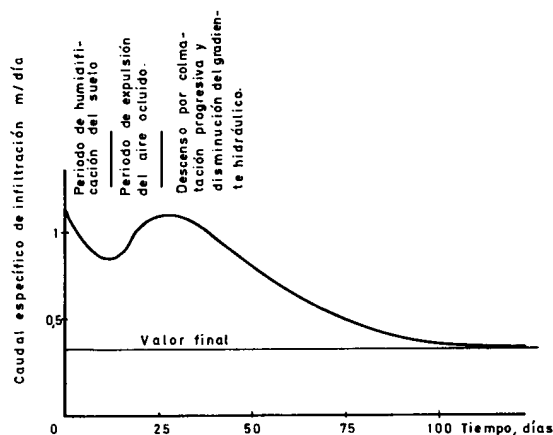


Fig. 2.62. Curva típica para el caudal de infiltración en función del tiempo (escalas orientativas). El valor asíntotico es casi cero en casos de agua muy turbia, abundantes finos y COT.

Comparando esta gráfica con la obtenida para la *Cubeta* (Fig. 2.56 a), se aprecia un ascenso bastante más brusco al inicio del ciclo para el caso de la zona de estudio. El período de desaireación es coincidente con el ciclo de heladas, sin presentar apenas variaciones. La tendencia final de la curva es asíntotica en ambos casos, guardando un gran paralelismo con el eje, como corresponde a aguas de recarga artificial con abundancia de sólidos disueltos (Custodio y Llamas, 1983).

En cuanto a la influencia de la calidad del agua de recarga artificial en la efectividad de las estructuras, cómo minimizar el efecto de las heladas y tratar la colmatación *in situ*, son temas abordados en el Bloque 5.

10.4. INFORMACIÓN OBTENIDA DEL ESTUDIO DEL AVANCE DEL BULBO DE HUMIDIFICACIÓN

En esta sección se describe cómo el seguimiento del bulbo de humidificación ha proporcionado información relativa tanto a aspectos poco conocidos del acuífero y de su comportamiento hidrogeológico, como a aspectos procedimentales que pueden ser mejorados en futuros ciclos de recarga artificial (AR).

En cuanto a la información relativa a la morfología y funcionamiento del **acuífero**, el seguimiento del bulbo corrobora la geometría del acuífero deducida a partir de su reconstrucción tridimensional (Aptdo. 5.5.).

Un aspecto importante ha sido el seguimiento del bulbo en las inmediaciones de la cabecera del dispositivo. En el sector sur hay instalado un piezómetro que registra en general ascensos durante todo el ciclo, mientras que al este del dispositivo de cabecera hay un nuevo piezómetro con tendencia descendente. Este hecho ha inducido a pensar en la existencia de una barrera hidrogeológica, cuya orientación correspondería a la del afloramiento de margas del Cuerno de la Revilla. Este afloramiento parece prolongarse en profundidad por lo menos hacia el sur, configurando una divisoria de aguas subterráneas. El sector este es drenado hacia el río Voltoya, mientras que el oeste es recargado de forma directa, si bien el dispositivo se encuentra por tanto en una posición excesivamente marginal del sector occidental.

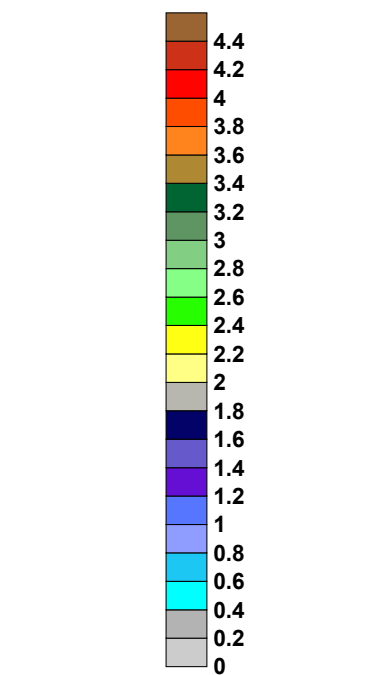
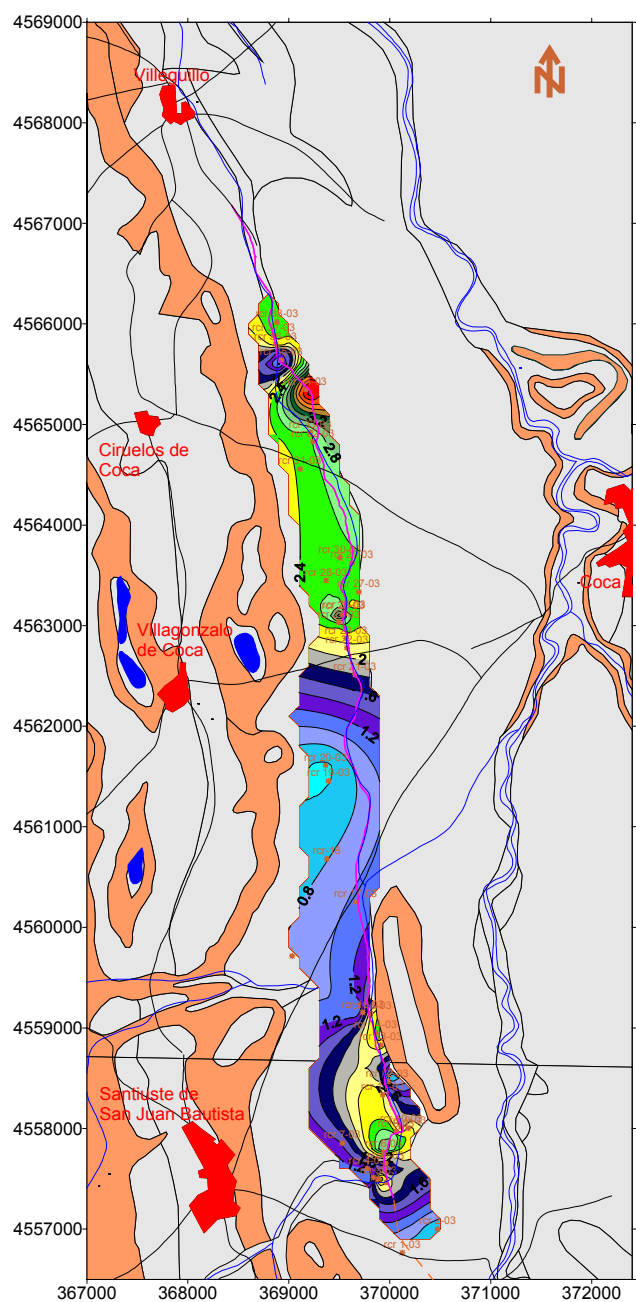
El estudio seriado del bulbo de humidificación aporta nuevos indicios de una divisoria hidrogeológica de orientación este-oeste en el sector central de la *Cubeta*, más o menos coincidente con la carretera de Villagonzalo a Coca. Este hecho ha quedado demostrado por el ensanchamiento del bulbo en las inmediaciones de esta divisoria, aspectos reflejados gráficamente en las cartografías hidrogeológicas (Aptdo. 8.3).

La distribución de la superficie de oscilación aporta información relativa a la potencialidad de almacenamiento de los sectores del acuífero. Se ha estudiado la oscilación máxima en todos los puntos que constituyen la RCR, observando que la variación máxima ha sido de 4,74 m y la mínima de 0,06 m. Los sectores donde están localizados los puntos de mayor fluctuación representan zonas de mayor potencialidad para la recarga artificial (AR). La localización de ellos se ha llevado a cabo mediante la elaboración de una cartografía específica (Fig. 2.63). En ella se presentan, mediante contornos coropléticos, aquellas zonas que han registrado baremos de almacenamiento por encima de la media (como es el sector *occidental-central* de la *Cubeta*).

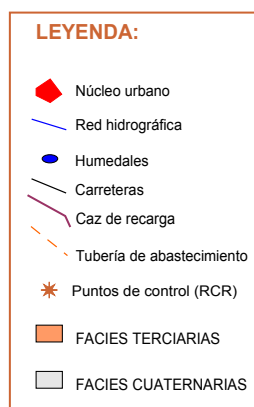
Aquellas zonas que apenas han visto alterados sus recursos renovables a lo largo del año, como es el sector oriental de la *Cubeta* y las zonas de pinar, han sido omitidas en la cartografía.

Fig. 2.63. Mapa de isovariaciones del bulbo de humidificación durante el primer período de recarga artificial. Año hidrológico 2002-03 (Página siguiente).





ISOVARIACIONES BULBO DE HUMIDIFICACIÓN
1ER CICLO DE RECARGA 2002/03



ESCALA 1:40.000

Cartografía digital de base: IGN 1:25.000

Datos de la Red de control RCR

ISOVARIACIONES DEL BULBO DE HUMIDIFICACIÓN 1ER CICLO DE RECARGA AÑO HIDROLÓGICO 2002-03



Las zonas de mayor oscilación corresponden al sector sur de la *Cubeta*, hasta alcanzar la primera zona de infiltración inefectiva del caz de recarga artificial en la falda de afloramiento de margas terciarias del Cuerno de la Revilla.

Junto a la divisoria hidrogeológica este-oeste del sector central se aprecian intervalos de variabilidad cercanos a los dos metros.

Ya en el sector occidental septentrional se aprecian fuertes variaciones como consecuencia del estrechamiento que presenta la *Cubeta* en este sector, especialmente al norte de la carretera de Coca a Ciruelos de Coca.

Algunos aspectos **procedimentales** tenidos en cuenta tras el seguimiento de la RCR son relativos, por ejemplo, al efecto barrera causado por determinadas obras y estructuras lineales (caz de recarga artificial, construcción de diques y drenajes del tren de alta velocidad, tuberías de conducción, etc). Por ejemplo, la vía del tren de alta velocidad está recogiendo una fracción de escorrentía importante, que es conducida al caz de AR, aportando un caudal extra que había sido considerado de manera distribuida. Este caudal ha sido detectado en aforos secuenciales a lo largo del caz (*MAPA, 2003*) y en el ascenso del bulbo en las inmediaciones de la vía del tren.

La presencia de divisorias naturales y artificiales introduce la necesidad de estudiar la evolución del caudal de recarga artificial a lo largo del dispositivo.

10.4.1. Perfil hidrogeológico a lo largo del caz

Se ha realizado un perfil longitudinal a lo largo del caz de recarga artificial. El perfil ha sido dividido en tres capas principales: la superficie topográfica, obtenida del MDT de un metro de precisión, la subdivisión de las facies cuaternarias entre materiales de naturaleza principalmente eólica y aluvial (división mayoritaria, al tratarse de un sistema mixto donde han coexistido espacial y temporalmente varios agentes y procesos genéticos), y el contacto entre la Formación Arévalo (acuífero) y las Facies Cuestas (acuitado), calculada en el Aptdo. 5.5.

El perfil del caz (de norte a sur) presenta, desde la cabecera “aguas abajo” una sucesión de “*Cubetas*” correspondientes a zonas deprimidas del paleorrelieve terciario colmatadas por materiales detríticos cuaternarios, y unas zonas consideradas “superficies de infiltración inefectivas” que han sido marcadas en la Fig. 2.52. En estas zonas se ha constatado el rápido avance del frente de avance de la AR, mientras que el agua se desplaza con más lentitud al atravesar el caz estas cubetas.

La primera de las cubetas queda localizada al sur de la cabecera del caz. Por este motivo, el bulbo de humidificación debe retroceder “aguas arriba” en el sentido del gradiente hidráulico natural para rellenar tal cubeta. La siguiente corresponde a la zona del Ramirón, hasta la superficie de infiltración inefectiva 1, donde el agua discurre sobre las facies margosas localizadas a escasa profundidad del afloramiento del Cuerno de la Revilla hasta la zona del Sanchón, donde se encuentra el primer aliviadero del caz.

Las siguientes cubetas corresponden a la zona de la *Dehesa* de Santiuste y la *Dehesa Tetuán* de Coca, zona de escasa anchura pero gran profundidad del acuífero superficial.

La segunda superficie de infiltración inefectiva se encuentra entre la zona del tren de alta velocidad y la carretera de Ciruelos de Coca a Coca, donde las Facies Cuestas se han localizado en perforaciones a menos de 4 metros de profundidad. Es en este sector donde se han producido las mayores inundaciones durante el primer ciclo de recarga artificial. La tercera gran cubeta corresponde a la zona del *Pinar de Ciruelos* y del Camino del Pinar.

La tercera superficie de infiltración inefectiva corresponde a un afloramiento de Facies Cuestas en el caz de recarga artificial, en la zona denominada El Puerco. Posteriormente se ha desarrollado una nueva cubeta hasta las inmediaciones de Villeguillo.

Todos los perfiles han sido trazados con las medidas disponibles de la RCP y RCR a lo largo del año hidrológico 2002/03, mediante la intersección de cada capa freática con el caz de recarga artificial, empleando para ello las aplicaciones *Surfer 8* (módulo *slice*) y *Grapher 3* para la superposición de los distintos perfiles georreferenciados. En esta misma figura aparecen los caudales de los aforos realizados con molinete en distintos puntos de observación en el invierno de 2004 (*en MAPA, 2003*) (Tabla 2.45).

Observando la secuencia de llenado de la *Cubeta*, se aprecia que la situación de partida es de aguas bajas, acumuladas en las depresiones del acuífero, y sucesivos niveles de llenado semiparalelos influidos por las operaciones de AR. Dado que el acuífero se encuentra en **régimen afectado**, las capas freáticas representadas han sido calculadas con datos reales y morfología difiere de la correspondiente a un acuífero en régimen natural.

A tenor de estos resultados, cabe destacar que la efectividad del caz de recarga artificial puede ser mejorada realizando dispositivos de infiltración en zonas de infiltración efectivas, en las que haya una formación almacén de suficiente potencia y en la que se produzcan fuertes extracciones en la época de riego.

Est nº	Est nombre	X	Y	Q (l/s)
1	CABECERA	370013	4557343	334.864
2	CURVA	370020	4558189	246.443
3	SANCHON	369680	4560341	239.172
4	CARRETERA DE VILLAGONZALO	369622	4562578	240.390
5	CRUCE AVE SUR	369547	4563190	274.260
6	CARRETERA DE CIRUELOS	369342	4564562	181.753
7	CUESTA DE JUAN AGUADO	368883	4566020	56.530

Tabla 2.45. Caudales aforados a lo largo del dispositivo de AR el 21-01-2004. Fuente: MAPA.

Estudiando esta secuencia se aprecia que la zona inicial del caz se encuentra cercana a la saturación, y la infiltración es baja con respecto a las primeras semanas del ciclo de recarga artificial. El caz se comporta de forma conservativa.

En la zona de cruce del puente del AVE, se aprecia un caudal superior. Este hecho está motivado por el drenaje de la superficie improductiva de la obra, al haber cunetones perimetrales que desembocan en el punto de aforo, según se aprecia en las Figs. 2.65 a) a c), correspondientes al paso del caz de recarga artificial por la vía del AVE y los cunetones de drenaje laterales.

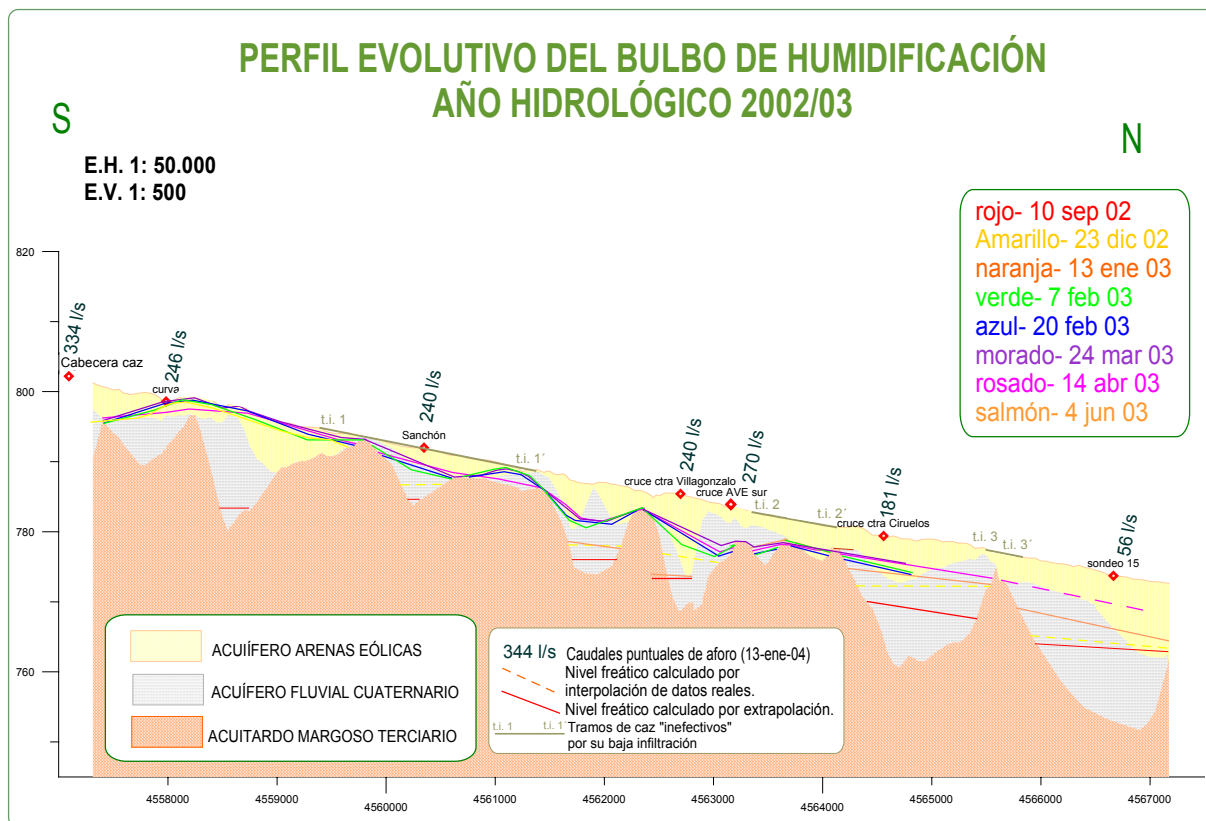


Fig. 2.64. Perfil evolutivo del bulbo de humidificación para el año hidrológico 2002/03 (1^{er} ciclo de AR).





Figs. 2.65 a) b) y c). Drenaje de la vía del Tren de Alta Velocidad y estructuras asociadas y paso del caz de recarga bajo la vía. En este punto se ha aforado un volumen superior al de la estación anterior por aportaciones en forma de escorrentía superficial canalizada.

Finalmente, se produce una fuerte infiltración en el sector septentrional de la *Cubeta*, al encontrarse bastante desaturado al inicio de las operaciones de AR, dado que esta zona registra fuertes extracciones para riego.

En marzo de 2004 fue realizada una ampliación del caz de AR hacia el norte, a través del segundo aliviadero, donde se bifurca por el camino de las carretas hacia el norte, hasta las inmediaciones de Villeguillo, y por el trazado antiguo del arroyo de la Ermita, discurriendo por la margen oeste del cordel de ruta hasta la localidad de Villeguillo. La conducción fue prolongada una semana después, atravesando el casco urbano a través de una antigua canalización, hacia el norte. Esta excavación no cuenta con revestimientos, obras de paso ni dispositivos de parada. Se trata de una excavación de emergencia que aparentemente formará parte en un futuro del dispositivo de AR. El trazado corresponde con el del arroyo de la Ermita. Bordea el cementerio de Villeguillo por el este y conecta con una antigua acequia que derivaba aguas hacia los huertos sociales del pueblo en la década de 1950.

En fecha 19 de marzo de 2004 el agua alcanzaba el final del dispositivo excavado, fuera de las tierras de labor, en el paraje de la *Cañadilla*, dentro del TM de Villeguillo. En esta zona había desarrollado un importante sistema de humedales, correspondiendo al sistema de desagüe natural del acuífero, que desaparecieron tras la implantación del regadío. Las coordenadas UTM del extremo norte del *dispositivo de recarga artificial provisional* son $X = 367069$ e $Y = 4569969$.

Las Figs. 2.66 a y b ilustran la excavación provisional realizada.



Figs. 2.66 a) y b). Afloramiento del caz por el norte de Villeguillo tras atravesar el casco urbano enterrado. Zona de alcance de la excavación junto a una antigua acequia y vertido sobre una superficie prácticamente plana en una zona adyacente a antiguos humedales.

En la actualidad el MAPA lleva a cabo estudios para la adecuación y mejora de este dispositivo, meramente provisional, llevado a cabo como medida de emergencia en un período con importantes precipitaciones. Es previsible que dicha ampliación tenga carácter fijo en un futuro próximo.

A tenor de los resultados disponibles, cabe anticipar una serie de conclusiones:

- La construcción de dispositivos provisionales representa una forma barata y eficiente de aprovechar el caudal derivado del río Voltoya evitando su retorno a través de los aliviaderos existentes y aprovechando los recursos para el fin previsto: la recarga artificial de acuíferos.

- El dispositivo de infiltración discurre en algunos sectores por “zonas de infiltración inefectivas”. Podría resultar conveniente su mejora de acuerdo con algunos criterios técnicos que son analizados en el Bloque 5.
- Un factor adicional a tener en cuenta al estudiar la efectividad de la recarga artificial es el rango de variación de la capa freática, con objeto de definir la *profundidad de alerta* y poder evaluar el impacto ambiental por inundación de determinadas zonas como consecuencia de las operaciones de AR.

10.4.2. Rango de variabilidad de la capa freática

La disponibilidad de datos de varias mediciones de las redes de control (RCP y RCR) han permitido estudiar la evolución del acuífero y ver el dinamismo de la superficie freática en el área durante el año hidrológico 2002/03, primer ciclo de recarga artificial dentro de una situación de “régimen influenciado”.

Con las medidas registradas se han elaborado mallas o grid que permiten una reconstrucción tridimensional de la capa freática, además de posibilitar operaciones de álgebra de mapas usando para ello programas de cartografía. Se han empleado varios interpoladores automáticos, con objeto de contrastar los resultados, especialmente el Kriging, el ajuste por mínimos cuadrados y la triangulación con interpolación lineal.

Comprobando los resultados de los interpoladores mediante operaciones de álgebra de mapas, se observan anomalías al aplicar los dos primeros. Estas consisten en que las interpolaciones realizadas de la capa freática en situaciones de aguas bajas, en algunos sectores, se encuentran por encima del nivel constatado, incluso de la situación de “aguas altas”, introduciendo un margen de error importante para cubicar volúmenes.

De todos los interpoladores empleados, se ha optado por la triangulación, al ofrecer unos resultados veraces y no proporcionar información “extrapolada hacia el exterior”, como ocurre con otros interpoladores.

Analizando los resultados obtenidos, el rango de variabilidad de cota de la capa freática en 1990 no se ha podido determinar mediante procedimientos automáticos, si bien, analizando la cartografía, se encuentra en torno a un intervalo de oscilación entre 0,7 metros (sector oriental) y 4,8 m entre la falda suroeste del Cuerno de la Revilla y la carretera de Santiuste a Nava de la Asunción (Figs. 2.100. a y b).

En el verano de 1999 oscilaba entre 730,87 y 799,28 m, con un rango de 71,88 m.

En septiembre de 2002 el rango de variabilidad oscilaba entre 749,7 y 811,3 m, con un rango de variabilidad de 61,51 m.

En febrero de 2003 oscilaba entre 750,9 y 811,8 m, con un rango de 60,88 m.

Estudiando la variabilidad en los puntos de control, se aprecian intervalos de variación una variación entre el verano de 1999 y 2002 de hasta 18,83 m, como corresponde a un ascenso de niveles generalizado para todo el acuífero.



En el año hidrológico 2002/03 se ha registrado una variación entre la situación de aguas altas y de aguas bajas máxima de **4,74 m** y mínima de **0,06 m** durante el primer ciclo de recarga artificial, rango propio de un acuífero de baja inercia.

Los máximos rangos de oscilación aparecen entre la localidad de Santiuste y el inicio del caz de recarga artificial, así como en la zona de *Cubeta* meridional occidental, zonas con fuertes regadíos y con escasa anchura del acuífero superficial. Esta zona coincide con el umbral que delimita los sectores septentrional y meridional, donde la morfología del paleorrelieve “*represa*” el flujo desde el sur hacia el norte. Hay humedales desarrollados de acuerdo con la orientación transversal (Laguna de la Iglesia). La tercera zona de máxima oscilación coincide con la cubeta del Pinar Nuevo, en Ciruelos de Coca.

Según se constata, las operaciones de recarga artificial (AR) apenas han influido en el sector oriental, donde el rango de oscilación puede ser considerado de índole “natural”. Donde mayor incidencia tienen estas operaciones es en las zonas regables, donde se producen los máximos descensos durante la época de riego.

La existencia de cubetas con ligeras oscilaciones está motivada en varias ocasiones por tener implantados cultivos de secano con escasas extracciones de aguas subterráneas.

El riesgo de inundaciones durante las operaciones de recarga *artificial* es controlado de forma simultánea controlando el nivel de los aliviaderos y de las paradas, con objeto de conseguir preservar la “*profundidad de alerta*”, que ha sido establecida en este tipo de acuíferos en **2 m** (Christen et al, 2001). De este modo, el nivel freático debe estar por debajo de 2 metros con respecto al nivel medio del terreno en la zona de estudio con objeto de evitar riesgo de inundaciones, si bien en algunos sectores podría ser inferior.

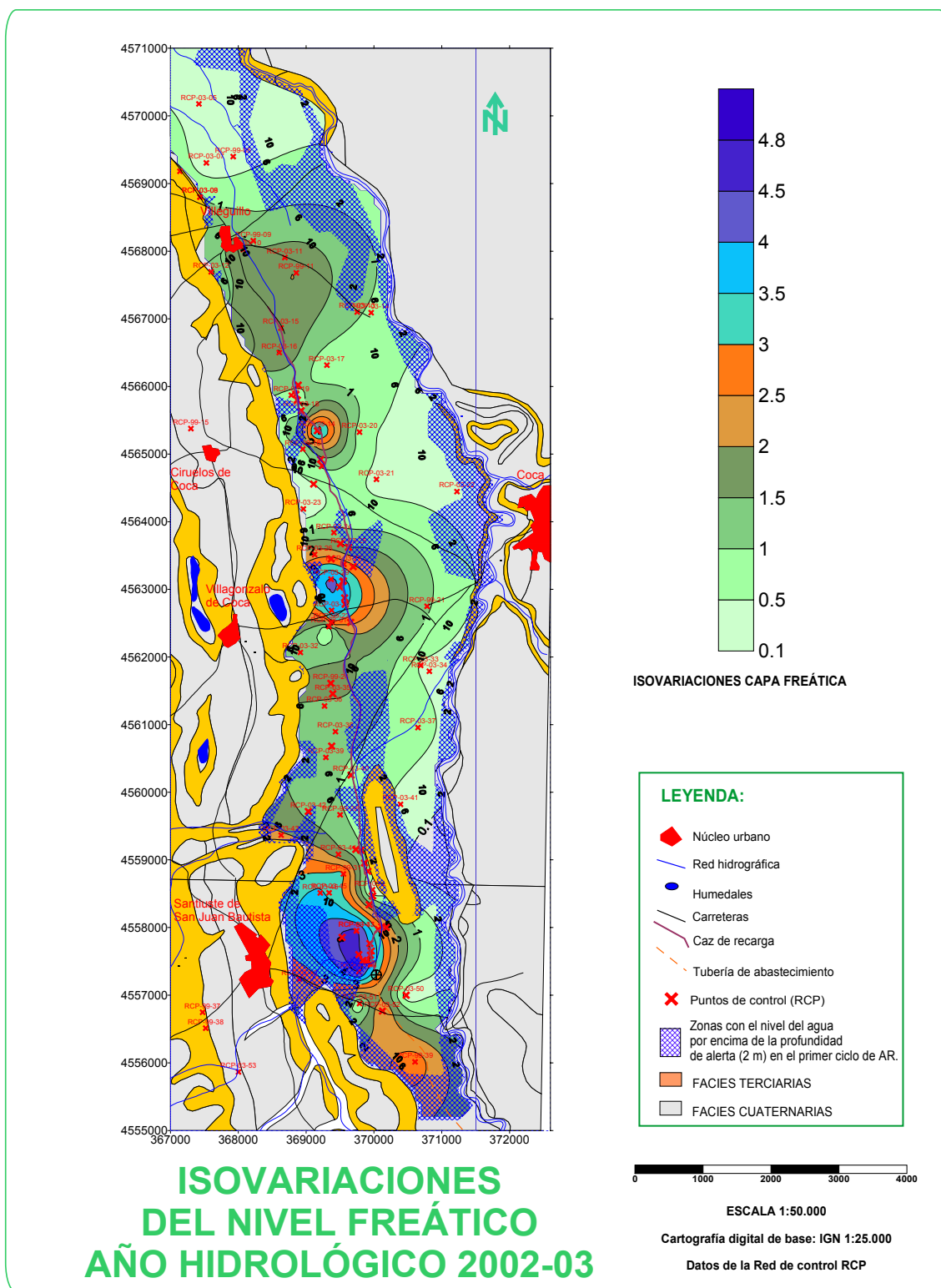
Las zonas con mayor riesgo de inundación durante el primer ciclo de AR han sido deducidas por operaciones de álgebra de mapas, detectando los sectores con el nivel del agua durante el ciclo de AR por encima de la *profundidad de alerta* de 2 m. La mayoría se encuentran en las márgenes de los ríos, quedando zonas de infiltración inefectiva del caz en el Camino del Ramirón, en la zona de intersección del caz con la carretera de Coca a Ciruelos de Coca, y también en el extremo norte de la *Cubeta*, en las inmediaciones de Villeguillo, cerca del rebosadero natural del acuífero.

En general se aprecia que las oscilaciones máximas se producen en las zonas de “*cubetas*” con máximo espesor de arenas y consecuentemente de acuífero, con regadíos implantados y un grado de explotación elevado. En zonas de pinar las variaciones del nivel del agua resultan poco relevantes.

Con las variaciones cuantificadas se ha realizado una cartografía específica en la que consta la distribución en el espacio de las variaciones a lo largo del año hidrológico 2002/03 (Figs. 2.67. a y b).

Fig. 2.67. Mapa de isovariaciones máximas de la capa freática para el período comprendido entre septiembre de 2002 y febrero de 2003. Se han representado las zonas con el nivel freático por encima de la profundidad de alerta (2 m) en algún momento del A.H.. (Página siguiente).







Esta cartografía representa un mapa de gestión ante las operaciones de recarga artificial, además de facilitar nuevas averiguaciones del funcionamiento del acuífero.

Sintéticamente cabe destacar:

- La presencia de domos en la capa freática representa un riesgo de inundación del terreno. Estos domos suelen aparecer en las zonas más deprimidas de la superficie, en zonas de muy alta permeabilidad y en zonas regables.
- La presencia de este tipo de domos en la superficie piezométrica debe ser controlada, al representar un riesgo de inundación en zonas someras.
- Las zonas con mayores descensos durante la época de riego o con mayor concentración de captaciones operativas deben ser objetivos prioritarios de AR, modificando el dispositivo de recarga artificial superficial o empleando nuevas técnicas como la recarga artificial a través de pozos y dispositivos de infiltración adecuados. Estos deben minimizar la entrada de aire al sistema, ser operativos incluso en situaciones por debajo de cero °C, etc. (en el Bloque 5 se analizan las alternativas de actuación en base a las experiencias obtenidas).
- La “profundidad de alerta” para este tipo de acuíferos, inicialmente estimada en 2 m (*Christen et al, 2001*) parece excesiva a tenor de los resultados. En principio se considera más apropiado fijar en 1,5 m tal límite.
- El método WTF volumétrico estadístico cobra especial relevancia para este cometido, puesto que la capacidad máxima de infiltración estará condicionada por el indicador de un nivel de agua medio cercano a 2 metros por debajo de la superficie media del terreno en la zona de estudio. Para la totalidad de la *Cubeta*, el nivel medio del terreno es de 780,59 m, mientras que la cota media de la capa freática en situación de aguas más altas fue de 776,87 m en febrero de 2003 (gran parte de este volumen correspondía a aire entrampado en el sistema). De este modo, queda todavía un espesor de ZNS susceptible de ser recargado cercano a los dos metros de espesor en el segundo ciclo de recarga artificial, hasta alcanzar una situación óptima de almacenamiento.

10.5. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ANTES Y DURANTE LA RECARGA ARTIFICIAL

El funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio presenta cierta complejidad, derivada de la especial geometría del acuífero superficial y de la abundancia de canales de arenas y gravas y niveles de limos y arcillas, que confieren a este acuífero una cierta heterogeneidad y anisotropía.

Los depósitos aluviales y lagunares que rellenan depresiones previas bajo las arenas eólicas aparecen conjugados con materiales terciarios alterados de hasta 4 metros de espesor, según los datos obtenidos en sondeos con extracción de testigo continuo. La delimitación entre facies cuaternarias y terciarias resulta inabordable por técnicas indirectas (prospección geofísica), puesto que el terciario alterado y el cuaternario aluvial presentan un comportamiento geoeléctrico parecido.

Bajo los depósitos aluviales y la “zona de transición” subyace un paquete de sedimentos detríticos terciarios con arcillas, pasadas arenosas y margas de las facies Cuestas, que funciona como acuitardo de escaso interés hidrogeológico. No obstante presenta estratos o vetas ocasionales de espesor inferior al metro por lo general de depósitos calcáreos tobáceos, detectado en sondeos entre 70 y 80 metros de profundidad.

Por debajo de esta formación y a una profundidad que ronda los 100 m se encuentra la Formación Puente Runel (fangos arcósicos y carbonatos), a través de la cuál el acuífero queda conectado con la circulación regional de la Cuenca del Duero.

Volviendo al acuífero superficial, este presenta varias peculiaridades, bien sea por la morfología del acuífero, la distribución de sus facies (con depósitos de llanura de inundación abundantes en el sector Este por desbordamientos históricos de los ríos Eresma y Voltoya) depósitos de piedemonte de la erosión del relieve terciario en un sistema salpicado de humedales y elevada salinidad y terrazas asociadas a los pequeños arroyos que atraviesan la *Cubeta* en dirección sur-norte (destacando el arroyo de la Ermita, que ha formado un sistema de terrazas de hasta tres metros de espesor en algunos sectores y anchura superior a 30 m).

El río Voltoya ha diseccionado al acuífero, que presenta unas características parecidas en la zona de estudio, si bien los espesores en la margen derecha son inferiores, o bien aflora el terciario con pequeñas cubetas rellenas de arenas eólicas cuaternarias de escasa potencia, por tanto el acuífero en la margen derecha de río es de menor interés.

La infiltración a partir de las aguas de lluvia y escorrentía superficial constituye la principal vía de recarga del acuífero O. Se produce principalmente desde los relieves elevados situados el Oeste y la entrada por arroyos ocasionales de escaso caudal, sobre todo por el suroeste, como son Prado Largo, Valhondo y Estanquero, situados al Sur de Santiuste, y el arroyo de Salmoraz, inmediatamente al norte de esta población. El arroyo de la Ermita constituye el colector principal de las aguas superficiales. Actualmente solo corre en época de fuertes lluvias, cuando se observa como disminuye su caudal hacia el norte (aguas abajo) debido a la infiltración que se produce a través de su cauce.

El acuífero E sólo se recarga a través de la infiltración directa del agua de lluvia sobre su superficie.

La descarga del acuífero O se efectúa fundamentalmente a través de los bombeos de pozos y sondeos, mientras que el resto se drena subterráneamente hacia el norte de Villeguillo o percola (o se descuelga) hacia el acuífero profundo. Antiguamente, cuando no se explotaba el acuífero, la descarga tenía lugar al norte de Villeguillo, donde se originaban lagunas y encharcamientos al alcanzar el nivel freático la superficie del terreno (765 m).

La descarga del acuífero E se produce a través de rezumes y descargas evapotranspirativas en el escarpe occidental de las terrazas del Voltoya, por bombeo de pozos, por drenaje subterráneo en dirección norte y por percolación profunda a través de las Facies Cuestas y Puente Runel, en su parte norte.

Antes de la sobreexplotación del acuífero superficial este acuífero se descargaba hacia el norte mediante manantiales, originando el *arroyo del Cuadrón* que drenaba los encharcamientos producidos por la descarga del acuífero del ramal Oeste.

Tras el inicio de las operaciones de AR y del estudio de la evolución del bulbo de humidificación durante el primer ciclo de recarga artificial, cabe esperar que gran parte del drenaje de los sectores orientales se produzca a través de algunos manantiales situados en los taludes de los ríos, secos durante los últimos años. La elevación del nivel del agua contribuirá a su drenaje a través de zonas deprimidas del paleorrelieve, algunas determinadas por la tectónica, como es la cacera de Betaya, de orientación NE-SO, que se comporta como un dren que termina en una zona manantialosa cercana al Molino del Batán, zona del antiguo Puente de Hierro ferroviario y del moderno paso del AVE sobre el río Voltoya.

Con los datos obtenidos en los sondeos de la RCH (MAPA, 1999a), parece que el comportamiento regional del acuífero se ajusta al citado modelo conceptual, diferenciando aguas de circulación regional, evolucionadas, calientes y profundas; aguas de flujo intermedio y aguas someras, jóvenes y poco evolucionadas de flujos locales.

Según otros autores, *“La distribución irregular de los diferentes parámetros químicos es incompatible con la existencia de un flujo regional dirigido. Se trata por tanto de una serie de lentejones de escasa entidad embebidos en una matriz de permeabilidad muy baja”* (CEDEX, 1996). Según esta interpretación, la recarga tiene lugar principalmente por donde afloran dichos lentejones y por transferencias de largo recorrido en algunos puntos, como demuestran los datos isotópicos. Los estudios efectuados con los isótopos radiactivos Tritio y C^{14} arrojan una edad media de las aguas de 6.900 años según la misma fuente, y el 95% de la recarga de los acuíferos tiene lugar a través de solo el 45% del terreno, existiendo cambios drásticos en pequeñas distancias.

Debido a la baja permeabilidad de la matriz arcillo-limosa que conecta entre sí a los lentejones permeables, el flujo regional debe ser muy lento. Por tanto, puede esperarse que con un ritmo de extracciones alto, los niveles piezométricos experimenten un fuerte descenso, debido a la dificultad de reposición natural de las aguas subterráneas extraídas.

El gradiente hidráulico es hacia el noreste y los ríos Voltoya y Eresma tienen un carácter ganador, aunque la distribución de los parámetros químicos indica que ésta descarga debe ser escasa (*MAPA, 1999a*).

El estudio de los mapas hidroquímicos presentados en los antecedentes lleva a pensar en que la distribución de los diferentes parámetros e índices químicos muestra una gran irregularidad en su conjunto. No obstante se aprecian tendencias de cambio desde las zonas más salinizadas (entorno de Ciruelos de Coca -donde hay fases evaporíticas- y trazado de la cacería de aguas residuales de Santiuste, al E-NE de la localidad), en sentido centrífugo (*Galán et al, 2001b*).

El estudio del cruce de la cobertura de isocontenidos en ión sodio con el mapa de isopacas (*Galán et al, 2001b*), presenta unas máximas concentraciones salinas en la zona de bodones salinos de Villagonzalo y Ciruelos de Coca, asociados a yacimientos de minerales de la arcilla sódicos, tipo trona y nahcolita (*MAPA, 1999a*). También se detectan altas salinidades en las inmediaciones de Santiuste, coincidiendo con la zona de vertido de aguas residuales sin depuradora (influencia antrópica). También al noreste de Villeguillo, por evolución y envejecimiento de las aguas de acuerdo con el sentido del gradiente hidráulico en la *Cubeta* (SSO-NNE). En principio cabe destacar una cierta coincidencia entre las zonas de máxima concentración en sodio y los máximos espesores de acuífero, posiblemente por reciclaje del agua de riego en las paleocubetas del acuífero (*Galán et al, 2001b; Fdez. Escalante y López, 2002a*).

La sobreexplotación del acuífero superficial ha modificado el funcionamiento hidrogeológico del mismo, al provocar descensos en el nivel freático de 50-60% respecto al espesor saturado inicial del acuífero. Los más notables se han producido, lógicamente, en las zonas de descarga, desapareciendo las zonas húmedas y manantiales al norte de Villeguillo. También en la zona de transferencia lateral del acuífero O al E.

Las facies hidroquímicas de los sondeos “intermedios” confirman el carácter lenticular de las formaciones permeables (arenas y gravillas) intercaladas en el paquete arcillo-margoso. La distribución de los lentejones arenosos parece ser “aleatoria”, como corresponde a una sedimentación de carácter fluvial, y la permeabilidad de la matriz que engloba a dichos lentejones debe ser muy baja (*MAPA, 1999a*). Las facies de los sondeos profundos muestran una alta alcalinidad y salinidad (*Fdez. Escalante y López, 2002b*).

Ante este panorama, es evidente la influencia de aguas profundas en el funcionamiento del acuífero, en la generación de yacimientos salinos y en el carácter salino del agua de algunos bodones conectados con un flujo profundo. Estos flujos pueden ajustarse a los estadios iniciales de un modelo conceptual de *Toth*, típico de zonas periféricas de la Cuenca del Duero, sin quedar integrados en un esquema de largos periodos de circulación en zonas amplias.

El estudio evolutivo del funcionamiento hidrogeológico del sistema se ha realizado comparando cartografías hidrogeológicas seriadas de distintos periodos, que son:

- **Antes de las operaciones de AR:**

- 1990. Período en que el acuífero se encontraba en sobreexplotación después de un período de sequía mantenido (en *IRYDA, 1990*).



- Verano de 1999. El acuífero presenta un déficit hídrico, si bien menos severo que en 1990 (*en MAPA, 1999a*).
- Septiembre de 2002. Cartografía correspondiente al inicio del año hidrológico en que se ha llevado a cabo las primeras operaciones de recarga artificial superficial.

- **Después de las operaciones de AR:**

- Febrero de 2003. Situación de “aguas altas” por ser al año más húmedo en los últimos 100 años y por llevar las instalaciones de recarga artificial superficial funcionando durante aproximadamente tres meses.

Comparando estas cartografías, cabe destacar que comparando las situaciones piezométricas entre 1990 (*IRYDA, 1990*) y 1999 (*MAPA, 1999a*) se aprecia un descenso generalizado de niveles. En general las aguas subterráneas drenan la *Cubeta* hacia los ríos Voltoya y Eresma (ambos ganadores o conservativos en este tramo) en sentido suroeste-noreste y con gradientes entre el 2,8 y 8 ‰.

El estudio de 1990 llama la atención sobre dos **anomalías** en forma de “depresiones” detectadas en la capa freática, aparentemente atribuibles al efecto antrópico por ubicarse en zonas regables. La primera es la ubicada ligeramente al noreste del casco urbano de Santiuste, en el sector E, entre 770 y 760 msnm. Esta coincide con uno de los dos lineamientos estructurales cartografiados por el MAPA (*en MAPA, 1999a*), por lo que al efecto de la explotación intensiva se podría sumar un drenaje natural a favor de algún tipo de discontinuidad estructural hacia el cauce del Voltoya. La segunda de las cubetas cartografiada en 1990 sita en el sector central, en el centro de gravedad del triángulo Coca-Villagonzalo-Ciruelos de Coca. Sus equipotenciales oscilaban entre 790 y 760 msnm y presentaban una cuantía menor en 1999 debido al descenso generalizado del nivel del agua.

En las cartografías de 2002 y 2003 estas anomalías hidrogeológicas han sido suavizadas, si bien se detectan inflexiones insolidarias con las equipotenciales y líneas de flujo adyacentes. Su explicación más lógica es la presencia de acuíferos colgados en esta zona. Se han detectado siete sondeos distribuidos por la zona en los que se escucha el descuelgue de agua desde el acuífero superior hacia el profundo, constituyendo un acuífero colgado relativamente extenso. Este número podría ser superior, al no haber sido posible acceder a varias captaciones con caseta de protección.

En el Sector Norte no se han localizado anomalías importantes, ya que a pesar de estar implantada la mayor zona regable de la *Cubeta*, los regadíos proceden principalmente de detracciones del acuífero profundo mediante sondeos.

La evolución y desaparición de las anomalías detectadas pueden ser atribuidas a la realización de las primeras cartografías en períodos de sequía mantenida, y las dos últimas en un período húmedo, a lo que hay que añadir que la última se ha realizado tras tres meses de recarga artificial.

La cartografía del acuífero profundo (Aptdo. 8.3.3.) corrobora la interpretación de estas inflexiones o cubetas, al existir domos en la verticalidad atribuibles a recarga inducida por descuelgue desde el acuífero superior.

Con los datos disponibles en la actualidad, el volumen de agua de almacenamiento óptimo, considerando una “profundidad de alerta” media de 2 m y coeficientes de almacenamiento de 0,05 para las facies aluviales y lagunares y de 0,1 para las facies eólicas, asciende a 19,001 hm³.

El volumen de agua almacenado en el acuífero en febrero de 2003 (situación de “aguas altas”) asciende a 6,5 hm³ en facies fluviales y 10,65 hm³ en facies eólicas, lo que representa un valor de 17,15 hm³ en total. De este modo, el acuífero tiene una capacidad de almacenamiento cercana a 2 hm³ sobre la situación de febrero de 2003.

El sector Sur presenta escasas variaciones en la capa freática. En este sector se producen entradas de agua a la *Cubeta* a través de los arroyos colectores del Albillo y del Estanquero, y del arroyo de la Ermita. La baja densidad de regadíos no ha motivado variaciones fuera de la tendencia general.

Al Este de Santiuste de San Juan Bautista las equipotenciales cartografiadas en 1990 y 1999 entre 790 y 800 m presentan escasas variaciones. El hecho parece estar motivado por la “recarga artificial” inducida por la cacera de conducción y desagüe de aguas residuales durante todo el año en torno al punto de vertido de las aguas residuales de la población (en marzo de 2004 esta localidad carece de EDAR).

La zona detectada al norte de Santiuste, en la que había un acusado descenso del nivel freático con isopiezas comprendidas entre 780 y 740 msnm, presenta en la actualidad un nivel del agua más alto. La morfología de equipotenciales en círculos cerrados presenta en la actualidad una ligera inflexión, adaptada al borde del acuífero. Esta variación podría ser explicada por haber entrado en desuso captaciones que detraían importantes recursos del acuífero en aquel período.

El afloramiento longitudinal de facies terciarias de orientación norte-sur, localizado al noreste de la localidad de Santiuste (Cuerno de la Revilla), funciona como divisoria hidrogeológica de aguas subterráneas. Este afloramiento se prolonga en profundidad con la misma orientación hacia ambos lados, delimitando los dos principales sectores del acuífero superficial, designados como ramales derecho e izquierdo (*IRYDA, 1990*). En torno a este afloramiento se produce un flujo centrífugo, funcionando como bisectriz y divisoria hidrogeológica hacia el Este y Oeste.

En la zona del caz de Betaya se ha detectado un flujo de aguas subterráneas a favor del cambio de inflexión que presenta el río Voltoya. En este caso las líneas de flujo coinciden con la orientación del caz, es decir, hay coincidencia en la dirección de drenaje de las aguas superficiales y subterráneas al comportarse como un dren.

Ligeramente al norte aparece un nuevo umbral o divisoria de aguas subterráneas, en este caso de orientación Este-Oeste, que coincide en líneas generales con la carretera de Coca a Villagonzalo de Coca. Según los indicios presentados en el Aptdo. 5.3.1. (*análisis de estructuras*), corresponde a un levantamiento de origen tectónico que interrumpe la linealidad de los sectores localizados en la mitad meridional, y represa parcialmente el movimiento de aguas subterráneas hacia el noreste. Desde este umbral hacia el norte parece haber sistemas encadenados de depresiones semiendorreicas, conectadas por un sistema fluvial y, según varios indicios, lagunar en el sector más occidental. A pesar de haber varias cubetas parcialmente conectadas, sigue habiendo

una diferenciación entre los sectores Este y Oeste, aunque ya no tan clara como en el sector Meridional. Observando el paleorrelieve reconstruido en las Figs. 2.45, 2.46. y 2.49, se intuye una sucesión de cubetas “en cascada”, avalando la influencia lagunar en la génesis del sustrato de este sector y en su medio de sedimentación postterciario.

El sector septentrional Occidental presenta varias anomalías, como cubetas locales y zonas con descuelgue desde el acuífero superficial al profundo. Las líneas de flujo tienen orientación NE-SO y un gradiente superior al 5 ‰, si bien, lo más representativo es la presencia de zonas puntuales con margas a escasa profundidad (de 3 a 5 metros).

A tenor de los datos disponibles, parece existir un vínculo entre las cubetas del sector Oeste por un “corredor”, coincidente con el lineamiento que une polígonos cerrados de alta permeabilidad. Las dos cubetas mayores del sector *Oeste* coinciden además con el trazado del lineamiento estructural profundo NNO-SSE mencionado en los antecedentes bibliográficos (IRYDA, 1990).

El sector septentrional Oriental presenta espesores de arena importantes y un drenaje hacia el río Eresma de orientación ENE-OSO con un gradiente del 5‰, es decir, hay una cierta inflexión hacia el Este de las líneas de flujo con respecto a las del sector Sur. En la zona hay implantados pinares y no hay explotación de aguas subterráneas hasta la zona regable de Villeguillo. En el extremo septentrional de la *Cubeta* no se aprecia claramente la diferencia entre ambos sectores. En ese sector la elevación del paleorrelieve y disminución del espesor del acuífero parece motivar la implantación de un importante sistema de humedales hasta mediados del siglo XX.

La dirección de las líneas de flujo siempre ha sido hacia el noreste. Los gradientes hidráulicos medios son bastante superiores a la media de 1990 ($2,6 \times 10^{-3}$). Entre el casco urbano de Santiuste y la “cubeta” mencionada es de $3,1 \times 10^{-2}$. En una línea de sur a norte, el gradiente obtenido es de $8,05 \times 10^{-3}$, que es prácticamente el triple que en 1990. En la zona norte de la *Cubeta*, en una línea imaginaria desde Ciruelos de Coca hacia el Voltoya pasando por Villeguillo, el gradiente es de $8,4 \times 10^{-3}$.

Las cartografías de 1990 y 1999 contribuyen a incrementar la creencia de que el acuífero de la *Cubeta* se encontraba sobreexplotado. De este modo se registraba un incremento del descenso residual en cada ciclo anual.

En vista de la configuración, del paleorrelieve, de datos sedimentológicos e hidroquímicos, el sistema ha sido clasificado como “mixto” eólico-fluvial, y también lagunar. La presencia de varios humedales del Complejo Coca-Olmedo situados ligeramente hacia el Oeste (Villagonzalo y Ciruelos de Coca) sobre un sustrato similar al basamento del acuífero cuaternario, induce a pensar que antes de ser fosilizado el paleorrelieve por las arenas de la Fm. Arévalo había humedales bajo las arenas actuales. Los análisis de aguas realizados en captaciones del sector occidental central y septentrional apoyan este supuesto (en Bloque 3).

10.5.1. Modelo analógico

Una vez estudiada la estructura tridimensional del acuífero, se ha realizado simulado un modelo analógico en ordenador para el ensayo de su funcionamiento. Para

ello se ha contado con la reconstrucción tridimensional del paleorrelieve del acuitardo terciario, y se han simulado distintos “niveles de llenado”, calculando las superficies de intersección entre unas cotas determinadas (entre 725 y 820 msnm con un intervalo de 5 metros) y el paleorrelieve.

La simulación ha consistido en imaginar un nivel de llenado que ocupa el espacio más deprimido del acuífero, e imaginar un llenado de las cubetas desde la cota más baja hasta los 820 m, analizando su nivel de llenado y la cota a la que se produce el desbordamiento hacia las cubetas adyacentes, cuáles son y por dónde se lleva a cabo. De este modo se percibe si el modelo teórico interpretado, consistente en una serie de “cubetas en cascada”, corresponde con la simulación analógica.

Los distintos niveles de llenado sucesivos comprenden la cota del nivel freático, los niveles y el sentido de desbordamiento. Las imágenes son en perspectiva tomadas desde una dirección N24E y un ángulo de inversión de 65°. Al pie de cada imagen consta la cota de llenado correspondiente (Figs. 2.68. a y b).

Con un nivel de llenado desde 725 hasta 740 msnm las únicas cubetas que comienzan a almacenar agua son las dos situadas en el extremo norte de la *Cubeta*, en la zona de rebosadero natural del acuífero situada al norte de Villeguillo.

Con cota de llenado de 740 a 745 msnm la “paleocubeta” del sector central comienza a almacenar agua (localizada junto a la divisoria de aguas subterráneas coincidente con la carretera que va desde Coca a Villagonzalo de Coca). Así mismo los meandros del río Eresma se encuentran a esta cota y el manantial de Villeguillo, drenaje natural del acuífero septentrional seco en la actualidad debido al fuerte volumen de aguas extraído para riego entre la zona de recarga y descarga.

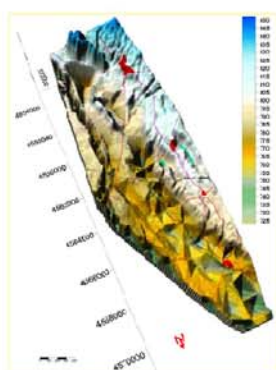
Con cota de llenado 750 msnm comienzan a almacenar agua todas las paleocubetas situadas en el sector septentrional al norte de la carretera de Coca a Ciruelos de Coca.

Con cota de llenado 755 msnm se producen las primeras conexiones hidráulicas entre las cubetas más septentrionales, en las que el agua se traslada hacia el norte (complejo de humedales situados al norte de Villeguillo) y hacia el río Eresma por rebosamiento en la zona del manantial de Villeguillo.

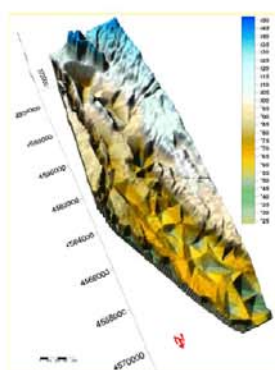
Con cota de llenado 760 msnm la cubeta localizada bajo el Pinar Nuevo de Ciruelos cede agua por rebosamiento hacia el norte a través del acuífero oeste, y hacia el río Eresma. En esta zona hay transferencia de aguas subterráneas hacia el acuífero este. Continúa además el drenaje del acuífero hacia el río Eresma hacia el norte de Villeguillo.

Con cota de llenado 765 msnm todas las paleocubetas del sector septentrional almacenan un cierto volumen de agua, habiendo circulación entre las situadas más hacia el norte (en rojo en la Fig. 765.jpg, mientras que en verde se presentan aquellas desconectadas hidráulicamente).

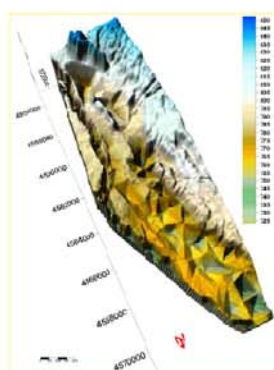
Figs. 2.68 a) y b). Hoja de contactos en la que se muestra la intersección de una capa freática ficticia horizontal y el paleorrelieve a comienzos del período cuaternario. Los distintos niveles de llenado son indicadores de la cota y del sentido de transferencia de caudales entre cubetas. Páginas consecutivas.



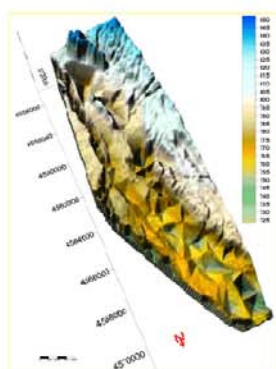
725base.jpg



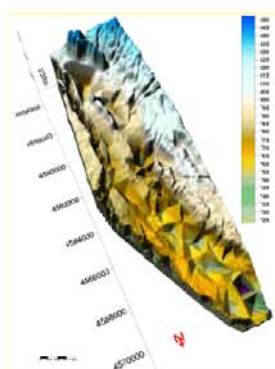
725cota.jpg



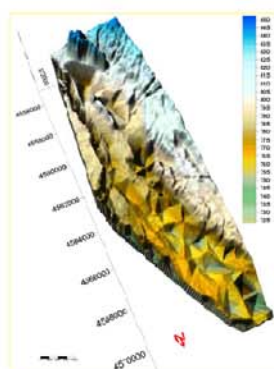
730.jpg



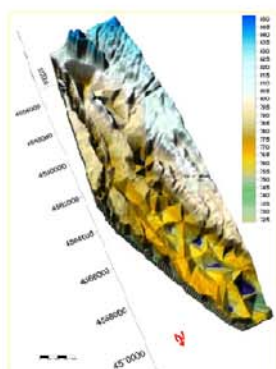
735.jpg



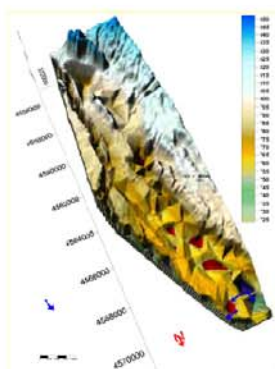
740.jpg



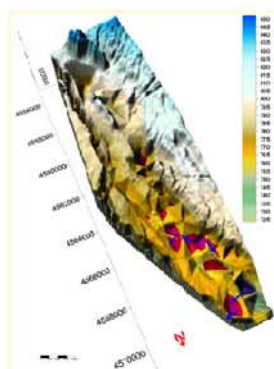
745.jpg



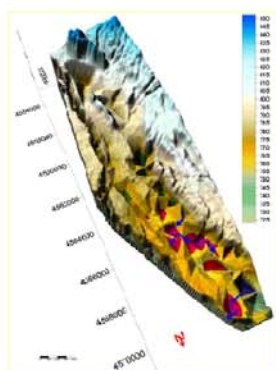
750.jpg



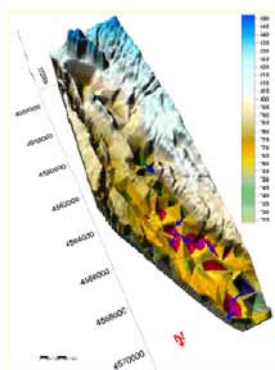
755.jpg



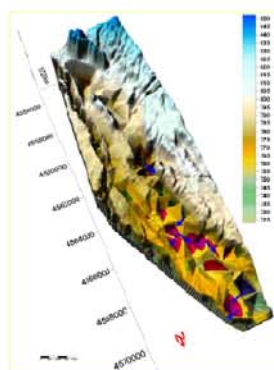
760.jpg



765.jpg

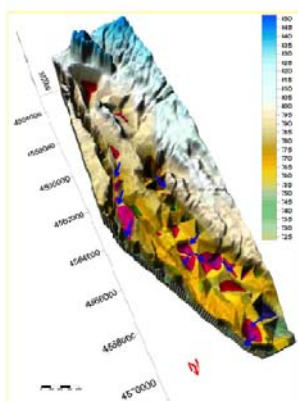


770.jpg

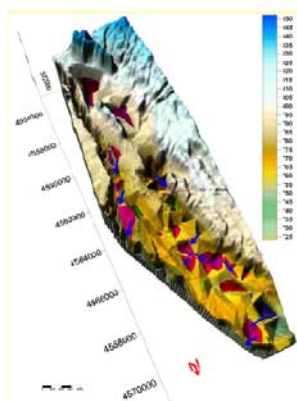


775.jpg

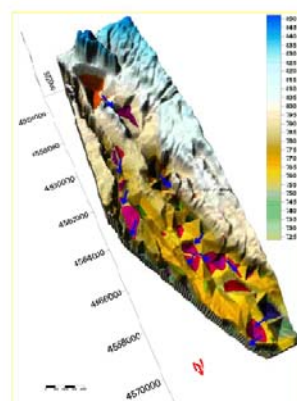




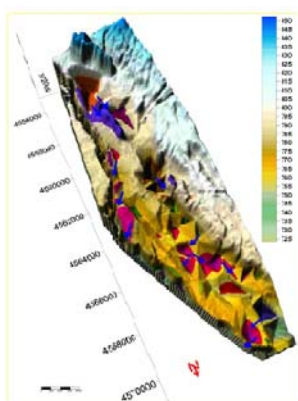
780.jpg



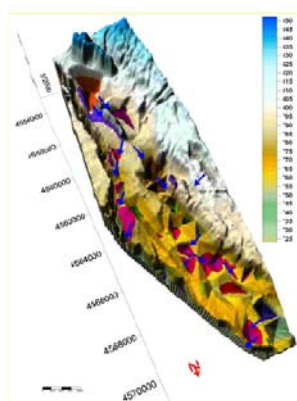
785.jpg



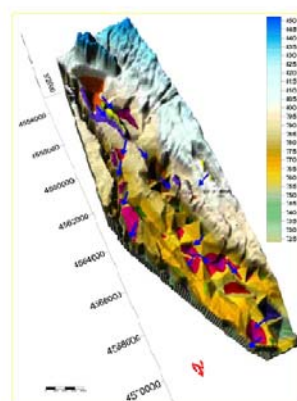
790.jpg



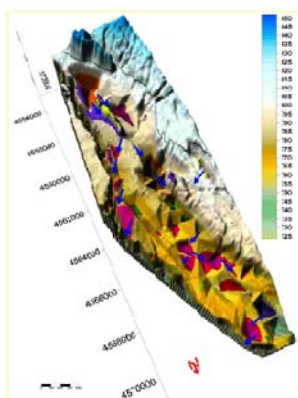
795.jpg



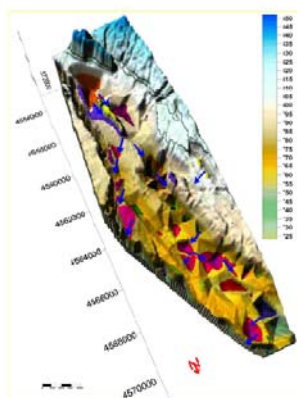
800.jpg



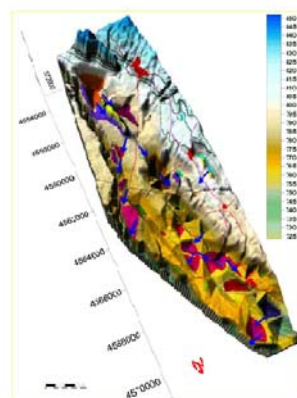
805.jpg



810.jpg



815.jpg



820-base.jpg



Con cota de llenado 770 hasta 775 msnm se crea circulación entre las cubetas localizadas en el sector central, coincidiendo con la zona más estrecha del acuífero oeste.

Con cota de llenado 780 msnm prospera la circulación entre zonas deprimidas del sector norte, quedando apenas una paleocubeta desconectada en la zona del Corbazo entre Coca y Ciruelos de Coca. El drenaje del acuífero meridional oriental se produce a través del dren coincidente con la cacera de Betaya actual (los manantiales de este sector se encuentran a una cota en torno a 775 m, al igual que el manantial del Batán). Comienza el nivel de llenado de las *Cubeta* del acuífero oeste en el sector meridional y su drenaje hacia el Voltoya a través de los manantiales del Lavadero y de la Fuente Fría.

Con cota de llenado 785 msnm prospera la situación anterior, especialmente en la zona de la cacera de Betaya, en la que el acuífero este es drenado con rapidez. Esta cota corresponde con la media de la superficie topográfica actual (783,26 msnm).

Con cota de llenado 790 a 795 msnm se aprecia circulación en el extremo meridional del acuífero oeste, con rebosamiento de la cubeta más meridional. Estas aguas se bifurcan al encontrar el afloramiento de margas terciarias del Cuerno de la Revilla, canalizándose hacia el acuífero oeste o bien hacia los manantiales del Lavadero por la falda sur del afloramiento. Se aprecia además el llenado de cubetas menores del sector central

Con cota entre 800 a 820 msnm apenas hay zonas dentro de la *Cubeta*, si bien el nivel de llenado coincide con las zonas endorreicas marginales en las que actualmente hay humedales (zona de Villagonzalo de Coca) y en el límite de la *Cubeta* por el sur (*Cuesta de Zutero* y *El Jinete*, al sur de la carretera de Santiuste a Nava de la Asunción).

El conocimiento de los niveles de transferencia, llenado y desbordamiento, así como las zonas a través de las que se produce el drenaje del acuífero de forma natural, debe ser tenido en consideración en el diseño de estructuras y para la planificación y gestión de la recarga artificial.

11. DIVISIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN UNIDADES HOMOGÉNEAS

Dentro de los objetivos del proyecto se contempla la subdivisión de la cubeta en zonas de menor entidad en base a criterios de homogeneidad, ya que la *Cubeta* presenta varias zonas de tipologías diferentes con comportamientos disociables.

En esta unidad se lleva a cabo la división de la *Cubeta* en unidades homogéneas, estableciendo unos criterios de partición y empleando para ello herramientas GIS. La subdivisión en unidades homogéneas se ha realizado en base a los siguientes criterios:

- Criterios hidrológicos (subcuencas hidrográficas y relación con los cauces fluviales).
- Hidrogeológicos (geometría del/los acuífero/s, zonas de recarga y descarga, así como de transferencia y zonas impermeables).
- Geológicos (afloramientos de materiales terciarios o presencia de yacimientos de posible interés minero, como son los minerales de la arcilla sódicos que se concentran en el sector occidental de la *Cubeta*).
- Topográficos (estudio de microcuencas hidrográficas, direcciones preferenciales de escorrentía superficial).
- Hidroquímicos (zonas homogéneas en base a la calidad de las aguas subterráneas).
- Antrópicos (usos del suelo o presencia de procesos contaminantes en niveles importantes).
- Medioambientales (presencia de flora o fauna específica, humedales, etc).

El cruce de todas estas coberturas indicarían una serie de polígonos con características homogéneas. Buscando un término para designar estos sectores, se ha analizado la procedencia de distintos conceptos:

- Unidad Ambiental (UA). Más que una entidad geomorfológica es una unidad geográfica de referencia para la toma de decisiones establecida a partir de un enfoque integrado (*Gómez Orea, 1999, EOI, 2000*).
- Dominio Morfogenético (DMG) (*IGME, 1964, en Dabrio, 1984*): "Zona de morfología variada, cuyas formas están relacionadas geométricamente" (sic).
- Unidad Morfogenética (UMG) (*Dabrio-ITGE, 1984*). "Depósitos o formas que presentan una geometría concreta y que están producidos por una acción o acciones igualmente concretas", o también "Área donde la morfología y el proceso están unificados" (sic). Esta clasificación incluye todos aquellos ambientes que pueden ser interpretados desde un modelo de formas-procesos, es decir, son el resultado de las morfologías creadas por efecto de los agentes (viento, ríos, etc) y procesos (erosión eólica, fluvial, etc.).

La aplicación del término "Dominios Morfogenéticos" se ha considerado inapropiada para los sectores estudiados. Puede resultar de idónea aplicación en el caso de estudios que aborden la organización y evolución del espacio, aunque su vinculación con su ambiente de formación es menor que en la Unidad Morfogenética. La UMG, por definición, hace alusión al ambiente geográfico y contexto geológico en el que se

generaron dichos transeptos, lo que conlleva claras connotaciones genéticas independientemente de su evolución posterior. Al ser un estudio de un medio tan dinámico, tampoco se considerada procedente aplicar este término a los sectores.

- Unidades hidrogeomorfológicas (UH_{Gm}). Los antecedentes consultados emplean este término al abordar temas relativos a geomorfología de los humedales, con un carácter restrictivo no extrapolable a zonas no húmedas.

En resumen, no existen criterios de homogeneización de la terminología hidrogeológica y geomorfológica, existiendo una alta variedad de términos que, en algunos casos, tienden más a emborronar el estado de la cuestión que a aplicar criterios de restricción en su empleo.

Dado que ninguno de los términos citados contempla tantas connotaciones inherentes a los criterios de subdivisión, corriendo el riesgo de contribuir a la confusión existente a la hora de clasificar zonas homogéneas, se ha designado a las unidades con el término “**Unidades Hidroambientales**” (UHAs). La definición más parecida sería la de “unidad hidrogeomorfológica”, si bien, presenta una mayor carga medioambiental y operativa.

Una definición propuesta para las UHAs sería: “*zonas o sectores homogéneos en que puede ser dividido un territorio de acuerdo con criterios de escorrentía superficial, homogeneidad litológica y estructural, funcionamiento hidrogeológico, propiedades hidroquímicas parecidas, geomorfología a escala de detalle, usos del suelo y aspectos medioambientales, planificados y gestionados mediante herramientas GIS*”.

Los aspectos medioambientales son los especificados en el Art. 8 del RD 1131/88 de Evaluación de impacto Ambiental y el Art. 2 del RD 6/2001.

La UHA tiene por tanto una importante componente de índole hidrogeológica, tecnológica y socioeconómica. Su establecimiento conlleva una serie de actuaciones, entre las que cabe destacar:

- Simulación de la realidad.
- Generación de datos nuevos.
- Elaboración de cartografías vectoriales georreferenciadas para el tratamiento de las actuaciones identificadas.
- Flexibilidad para ser utilizada como herramienta de planificación en situaciones cambiantes.
- Potencial para resolver problemas concretos.
- Facilidad para la difusión de la información de cada UHA.
- Herramienta de apoyo a la toma de decisiones, dada la gran cantidad de información temática que lleva incorporada cada UHA.

Las UHAs son altamente dependientes de la geometría y funcionamiento del acuífero, lo que facilitará la futura modelación matemática distribuida o cuasidistribuida del acuífero, que se plantea como futura línea de investigación.

Como herramienta para el estudio de previabilidad de realizar operaciones de AR en una zona determinada, permitirá la elaboración de un catálogo de posibles áreas

de actuación, que lleve emparejado un listado de alternativas viables. Su incorporación a un GIS es imprescindible para la localización de áreas susceptibles de recarga artificial.

Las UHAs, al llevar asociada una cobertura de “usos del suelo” posibilitan su aplicación a la ordenación territorial mediante herramientas GIS, y especialmente a la ordenación agraria, pudiendo ser empleada para el diseño de zonas regables, lleven o no asociados dispositivos de AR.

El empleo de técnicas GIS para la ordenación agraria precisa de una recopilación de datos adecuada, una correcta definición de los criterios básicos de utilización, de los umbrales de operatividad, y un balance de los requerimientos medioambientales y sociológicos basados en el desarrollo sostenible (*Fitzpatrick et al, 1999*). Estos criterios también son aplicables para las operaciones de recarga artificial de acuíferos (*Dowling et al, 2000*).

Los **criterios procedimentales** de delimitación en la zona de estudio han sido:

En cuanto a su **hidrología**, la zona de estudio está compuesta por dos subcuencas hidrográficas principales. La mayor parte de la *Cubeta* se encuentra en la subcuenca del río Eresma, al cual cede la mayoría del caudal de drenaje del acuífero. La mitad meridional se encuentra en la subcuenca del río Voltoya, que controla el funcionamiento del sector este.

La subdivisión por criterios **hidrogeológicos** ha quedado establecida en apartados precedentes. En líneas generales se pueden diferenciar dos sectores separados por afloramientos terciarios en dirección norte-sur en la horizontal, y tres acuíferos en la vertical, resultando de especial relevancia el superior, al constituir la principal formación objetivo ante las operaciones de recarga artificial (AR).

En cuanto a la **geometría del acuífero**, a partir de la reconstrucción de la paleogeomorfología, con objeto de facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema. Para tal reconstrucción se han generado mapas para su tratamiento cartográfico y elaboración de bloques-diagrama del acuífero, y perfiles hidrogeológicos. De este modo es posible una división longitudinal y otra transversal en dos sectores cada una.

En cuanto a la división por criterios **topográficos**, se ha llevado a cabo un estudio de microcuencas hidrográficas empleando para ello el MDT de la JCL de un metro de precisión. En general, la topografía de los terrenos afectados es muy llana en el centro de la *Cubeta* desde Santiuste a Villeguillo, con una pendiente media del 0,28 % por el trazado del arroyo de la Ermita, que será el principal canal de recarga artificial, al constituir la red de drenaje principal. En el sector septentrional aparecen varias microcuencas endorreicas escasamente drenadas, en general asociadas a lugares de descarga del acuífero y generación de humedales.

La importancia de los procesos **hidroquímicos** es sobresaliente, no solo como base para adoptar criterios de delimitación, sino también por su influencia genética directa en el sistema. Las características hidrogeoquímicas son agentes modeladores del paisaje hasta el punto de poder dividir al paisaje en dos áreas: las que se encuentran bajo la influencia directa del agua subterránea o fuera de ella. En base a estas se puede establecer una tipología genética y funcional de los hábitats de descarga en Los

Arenales, aunque gran parte de los resultados son extrapolables a zonas detríticas en clima semiárido del mundo (*Rey Benayas, 1992a, b y 2001; Ayuda y García, 2001*).

Las isocoras de iones salinos se ajustan por lo general a la división longitudinal en ramales, con ciertas anomalías, sin que se puedan establecer divisiones adicionales en función de las concentraciones de iones alcalinos (Bloque 3 y anexo 3.1.3).

En cuanto a la distribución de la conductividad, se aprecia una variación solidaria con el gradiente hidráulico, aumentando de sur a norte en el extremo meridional. Hay además tres cubetas distribuidas en la zona, coincidiendo con zonas de mayor presencia de yacimientos de sales y bodones de aguas saladas (zona centro-occidental) y en la zona regable ubicada al sureste de Villeguillo.

La cartografía de isocontenidos en cloruros presenta zonas de máxima concentración que coinciden a grandes rasgos con las anteriores y con las cubetas marcadas en el mapa de isopacas, a las que hay que añadir la presencia de fuertes concentraciones al este del casco urbano de Santiuste, en las inmediaciones de la zona de vertido de aguas residuales sin depuradora.

La de isonitratos presenta un fuerte gradiente desde los afloramientos terciarios, con muy bajas concentraciones, hacia las zonas regables, donde son muy altas. Se ha llegado a detectar una concentración de 284 mg/l en el sondeo nº 18 de la RCH.

El principal criterio de subdivisión **antrópico** se ajusta a criterios cualitativos de las aguas subterráneas (presencia de procesos y vectores contaminantes) y cuantitativos (distribución de los regadíos) frente a la ocupación del suelo por pinares.

Los criterios **medioambientales** se centran básicamente en la distribución de unidades ambientales. En general se distingue una vasta extensión de pinar en el sector este, regadíos y terrenos de secano en el oeste, y humedales y bodones en el norte.

Como apreciación adicional, cabe destacar que en la delimitación de las unidades se genera un “*bucle*”, en el que el avance en el conocimiento del funcionamiento del acuífero permite avanzar en el conocimiento de sus unidades homogéneas y su distribución, y viceversa. Se crea de este modo un proceso iterativo en el que la delimitación de las unidades serán mejoradas a medida que avance el grado de conocimiento, si bien, la delimitación inicial podrá ser redefinida con nuevos datos.

De acuerdo con este proceso iterativo se propone una primera división en unidades hidroambientales, resultante del cruce de las coberturas presentadas, que representa el “punto de partida, y queda como sigue:

En principio cabe señalar cuatro *UHAs* en base todos los criterios mencionados, que son el occidental y el oriental de acuerdo con la división longitudinal por afloramientos de Facies Cuestas o presencia a escasa profundidad, y los sectores septentrional y meridional, al haber una zona de discontinuidad en sentido norte-sur. Atendiendo a criterios adicionales, como son el espesor del acuífero cuaternario, el grado de salinidad y alcalinidad de las aguas subterráneas, el funcionamiento del acuífero superficial, la presencia de drenes y discontinuidades tectónicas, cada sector puede ser subdividido, a su vez, en dos nuevos ramales. El resultado final es una subdivisión en un

total de ocho *subunidades Hidroambientales (UHAs)*. Estas han sido designadas, de manera arbitraria, en sentido positivo, comenzando la *subUHA* 1 en el extremo sureste y la 4 en el suroeste. Cada UHA ha sido a su vez dividida en dos sectores: A y B.

En la Fig. 2.69, realizada a escala 1:40.000, se muestra la superposición de las principales coberturas temáticas con objeto de investigar criterios de homogeneidad hidrogeológica, medioambiental, etc. y la delimitación de las UHAs definidas, así como su subdivisión. En la leyenda constan la mayoría de las coberturas digitales empleadas en su demarcación.

El primer sector coincide con el sector meridional oriental, y queda subdividido en dos UHAs por un lineamiento que lo delimita por motivos tectónicos, coincidiendo con un meandro del río Voltoya fuertemente inflexionado que funciona como dren y que presenta manantiales en su talud.

El sector septentrional oriental presenta una subdivisión menos clara, que es establecida por usos del suelo y presencia de microcuencas hidrográficas (UHAs 3 y 4). La UHA 4 corresponde a la zona de descarga del acuífero, con frecuentes humedales.

El sector septentrional occidental puede ser delimitado, de nuevo transversalmente, en las UHAs 5 y 6. La UHA 5 se asocia a materiales de baja permeabilidad y la zona de descarga del acuífero al norte y noroeste de Villeguillo, quedando separada de la UHA 4 por usos del suelo y morfología del acuífero, especialmente en cuanto a espesor se refiere. La UHA 6 presenta procesos salinos y posiblemente flujos ascendentes profundos. En este sector el acuífero superficial pierde anchura, al aflorar nuevas facies terciarias, existiendo dos paleocubetas ubicadas al norte de Ciruelos de Coca.

El último sector, meridional oriental, queda separado del anterior por un umbral hidrogeológico, en el que las isopiezas presentan una elevación superior a la de los alrededores, según se puede apreciar en las cartografías hidrogeológicas presentadas, especialmente las previas a las operaciones de AR. Los criterios de división de las UHAs 7 y 8 son hidrogeológicos (presencia de anomalías en las isopiezas), tectónicos (presencia de lineamientos intermedios) y los relativos al espesor del acuífero.

La delimitación cartográfica presentada es puramente operativa, ya que las UHAs conllevan una información tridimensional inherente a su definición.

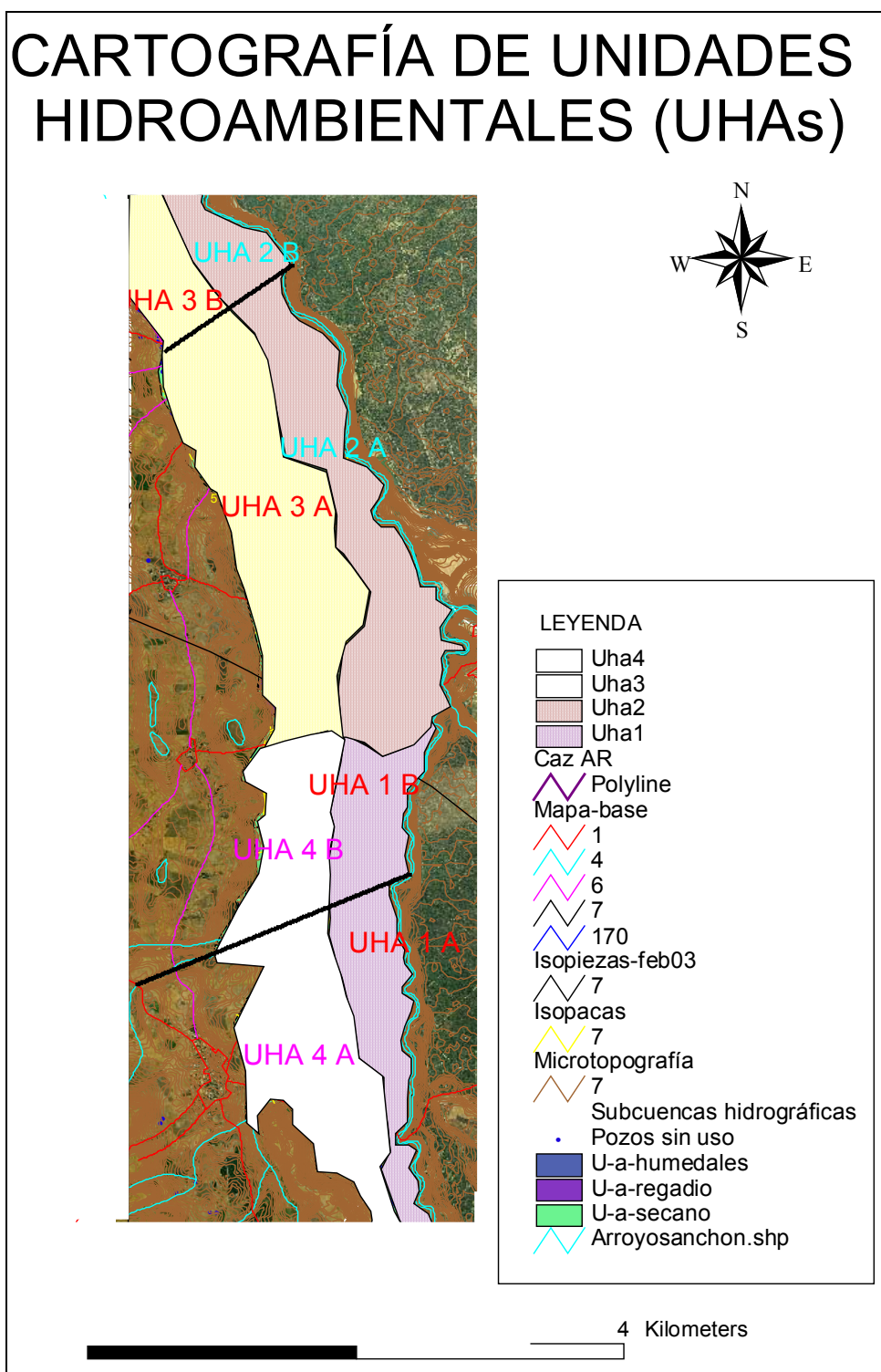


Fig. 2.69. Cartografía de Unidades Hidroambientales sobre la ortoimagen digital. Escala aproximada 1: 150.000.

12. CONCLUSIONES DEL BLOQUE 2

En este bloque se han empleado variadas técnicas y herramientas con el objetivo de profundizar en el conocimiento del sistema, especialmente en los aspectos menos desarrollados o no contemplados en los antecedentes bibliográficos.

En la actualización de la **cartografía geológica** cabe destacar que en la cartografía previa hay elementos omitidos de gran importancia en el funcionamiento del sistema, como son fallas supuestas fosilizadas por los materiales detríticos y niveles de terrazas. Estas fallas han sido constatadas en campo y predominan las de orientación NE-SO en el sector meridional de la *Cubeta*. Los meandros del río Voltoya, los arroyos tributarios que se dirigen a la *Cubeta* y los manantiales en la intersección con los cauces fluviales confirman la hipótesis de que éstos lineamientos funcionan como drenes.

La influencia de la **tectónica en el área de estudio** ha condicionado su funcionamiento hidrogeológico. Observando las directrices hercínicas y alpinas principales presentes en la *Cubeta*, se aprecia que hay estructuras heredadas e incluso una cierta actividad tectónica durante el cuaternario. Estos hechos han sido confirmados mediante diversas técnicas, como estudios de teledetección, de fotointerpretación, de modelos digitales del terreno actuales y del paleorrelieve, así como estudios de datos estructurales de campo, estudios de sedimentología y de geomorfología.

En cuanto al estudio de lineamientos se aprecia que el trazado de los ríos Voltoya y Eresma se adaptan a unas directrices tectónicas, predominando las de dirección NO-SE hacia NNO-SSE (típica de lineamientos tardihercínicos) y ENE-OSO. A escala local se han detectado además lineamientos con orientación NE-SO y N-S, lo que induce a pensar en un comportamiento tectónico en la zona de la *Cubeta* insolidario con el resto del acuífero en que se encuadra. La orientación y densidad de lineamientos difiere de norte a sur, lo que constituye un criterio de división de la *Cubeta* en dos sectores por su comportamiento tectónico. En el septentrional predominan los de dirección NNO-SSE y en el meridional los de orientación NE-SO y N-S.

Se ha ensayado una técnica novedosa basada en el estudio del paleorrelieve a finales del terciario, realizando para ello **mapas de pendientes** actuales y del muro del acuífero a partir de mallas. De acuerdo con este estudio de pendientes del paleorrelieve mediante derivadas direccionales, se han deducido las orientaciones preferentes de los lineamientos, que son, en el sector norte la NNO-SSE, NO-SE y NE-SO; en el sector sur predominan los lineamientos ENE-OSO, NE-SO y NNO-SSE, direcciones concordantes con las deducidas del estudio de lineamientos.

Se han estudiado estructuras menores en 11 **estaciones mesoestructurales** (10 donde afloran Facies Cuestas y una en las calizas del Páramo). La orientación de máxima compresión (δ_1) media oscila en torno a N133E (NO-SE), que corresponde con una orientación tardihercínica típica. Las principales direcciones de discontinuidad estructural deducidas son: NNO-SSE y NO-SE; NNE-SSO; NE-SO (N40E) (coincidente con una de las orientaciones principales de fracturación tardihercínica en la Cuenca del Duero) y dirección de compresión según la orientación N128 a 138E (δ_1), ortogonal a la dirección de esfuerzos distensivos N38 a 48E (δ_3).

En cuanto a la **sedimentología**, se ha realizado un estudio de la distribución de los materiales cuaternarios, especialmente aluviales de arroyos que diseccionan afloramientos terciarios y de terrazas, y coluviones entre colinas. Para ello se han interpolado sus bisectrices y medido su orientación mediante GIS. Los resultados son bastante concordantes con los obtenidos aplicando las técnicas previas. La orientación predominante es la NE-SO y la NNO-SSE, con una desviación típica inferior al 10 %.

Los **niveles de terrazas** aportan importante información relativa a los indicios de actividad tectónica. Se han detectado y cartografiado hasta tres niveles de terrazas en los cauces de los ríos Voltoya y Eresma y hasta dos niveles en el arroyo de la Ermita. Las terrazas presentan mayor desarrollo en la margen izquierda que en la derecha de los ríos principales y están alineadas, sobre todo, según la orientación NE-SO.

Se han detectado ciertos **rasgos geomorfológicos** indicativos de actividad tectónica en la *Cubeta*. Entre éstos cabe destacar la existencia de humedales en zonas de drenaje al norte de la *Cubeta* adaptados a una cierta movilidad del sustrato en la vertical, presencia de depósitos cuaternarios adaptándose al paleorrelieve, el alineamiento espacial de las “*paleocubetas*” fosilizadas (deducidas del mapa de isopacas) y bodones de acuerdo con la orientación NNO-SSE, cambios bruscos en las paleocorrientes que indican modificaciones súbitas del trazado de los cauces, etc.

Para medir la actividad tectónica y estudiar su influencia en el comportamiento hidrogeológico del medio, se han calculado tres **índices geomorfológicos** relacionados con los procesos erosionales y deposicionales asociados a sistemas fluviales (*Keller, 1986*): el Índice gradiente del Talveg (“Stream gradiente Index”) S.L. (*Hack, 1973*); el Índice de sinuosidad de escarpes (*Bull & McFadden, 1977*) y el índice Relación anchura del fondo de valle/altura del valle (*Bull, 1977*). Según éstos, existen zonas con indicios de posible actividad en la confluencia del río Voltoya con el Arroyo Balisa, donde se registra el meandro de mayor curvatura de la zona, y en las inmediaciones del antiguo Puente de Hierro, junto a la desembocadura de la cacera de Betaya.

Se han estudiado las **anomalías geomorfológicas**: asimetrías en la distribución de la red de drenaje, en el número de terrazas y en la forma de los valles (*Garrido-Mejías, 1982*), basados en la sinuosidad de los cauces y los radios de curvatura, técnica que ha apoyado los resultados anteriores.

El estudio de la **geometría del acuífero** cuaternario de la Cubeta de Santiuste se ha realizado a partir de un total de 314 datos puntuales obtenidos bien en afloramientos, en columnas litoestratigráficas de perforaciones o por métodos indirectos (sondeos eléctricos verticales). Con la totalidad de los datos han sido elaboradas unas mallas o *grids* con las que se ha reconstruido el paleorrelieve en el terciario, un bloque diagrama y un mapa de isopacas. Estos elementos han contribuido a la comprensión del funcionamiento hidrogeológico del sistema.

La interpretación genética, de acuerdo con el modelo tectónico elaborado y los datos sedimentológicos, puede ser explicada por el basculamiento hacia el noreste de uno o varios bloques del basamento cristalino que comprenden a la *Cubeta*, acompañado de un movimiento compresivo ortogonal con flexura, mientras que la vergencia general de la cuenca del Duero es hacia el Oeste. Entre los sectores septentrional y meridional hay un comportamiento diferencial, lo que permite definir dos sectores diferenciados.

Desde un punto de vista “**hidrogeomorfológico**”, a grandes rasgos, cabe dividir la *Cubeta* horizontalmente en dos grandes unidades longitudinales. Estas quedan divididas por un afloramiento de materiales terciarios, localizado al noreste del casco urbano de Santiuste, en un montículo elongado con el eje principal en dirección en dirección norte-sur (Cuerno de la Revilla).

De acuerdo con esta división, el **sector Oeste** podría corresponder a un paleocauce en el que se suceden 4 cubetas paleogeomorfológicas de profundidad superior a 15 metros y hasta 45, en una estructura de drenaje superficial vertiente hacia el norte. Las cubetas están alineadas según la dirección N12O, es decir, NNO-SSE. Además hay cubetas de menor entidad diseminadas por la zona de estudio.

El **Sector Este** o ramal derecho aparentemente contaba con cauce fluvial encajado, que drenaba desde la divisoria de aguas hacia el Este, confluyendo con el río Voltoya a través de un paleocauce coincidente a grandes rasgos con la actual cacería de Betaya. Existían además “cubetas” desconectadas en áreas endorreicas alineadas según la orientación NNO-SSE y un sistema de drenaje semiparalelo al actual arroyo de la Ermita, que drena el ramal derecho hacia el Sector Norte, donde, por topografía, consolidaba un sistema de humedales donde han sido testificados depósitos de llanura de inundación.

En este sector se ha desarrollado un acuífero de unos 11,5 km longitud y una anchura media de unos 700 m. Su profundidad media oscila entre 5 y 25 m. En su trazado es atravesada por los cauces de los ríos Voltoya y Eresma de forma oblicua, que drenan el acuífero al tener un comportamiento ganador en este tramo.

De acuerdo con la geometría reconstruida, el sistema morfogenético del acuífero sería fluvio-lacustre altamente condicionado por la tectónica, con una serie de “**cubetas en relevo**”, cuyo llenado produciría el desbordamiento sobre la cubeta siguiente y así sucesivamente. Sobre éste se implantó el sistema dunar cuaternario que constituye, en su mayor parte, el acuífero superficial.

Se han realizado cálculos del volumen del acuífero mediante operaciones de álgebra de mapas, obteniendo cubificaciones de **317.041.552 m³**, para el acuífero mixto, de este volumen, **181.958.951 m³** corresponde al acuífero de arenas eólicas y los **135.082.601 m³** restantes corresponden al acuífero mixto fluvial y lagunar. El volumen saturado de acuífero superficial eólico, considerando una “profundidad de alerta” media de 2 metros, asciende a **122.471.511 m³**. Si se considera un coeficiente de almacenamiento de 0,05 para las facies aluviales y lagunares y de 0,1 para las eólicas, la capacidad máxima de almacenamiento en el acuífero cuaternario asciende a **24,95 hm³**.

En cuanto a las contribuciones al conocimiento hidrogeológico del medio, se han estudiado varios puntos genéricos:

La **hidroestratigrafía** permite diferenciar tres formaciones de comportamiento hidrogeológico diferente en la vertical, designadas *acuífero superficial*, *intermedio* y *profundo*. Su funcionamiento parece ajustarse a un modelo conceptual de tipo *Toth*.

Las formaciones cuaternarias eólicas, aluviales y carbonatadas lacustres que constituyen el **acuífero superficial** presentan espesores de hasta 40 m en la zona de

rebosadero del acuífero, al norte de Villeguillo, según se ha constatado en sondeos mecánicos, y hasta 52 metros por métodos indirectos (sin constatar mediante perforaciones) en el depocentro de las cubetas de máximo espesor sedimentario.

El acuífero eólico superficial presenta en su conjunto un comportamiento libre, aunque hay niveles confinantes locales con frecuentes lentejones arcillosos, paquetes de gravas y cambios laterales de facies que le dotan de una cierta heterogeneidad y anisotropía.

El **acuífero intermedio** está constituido por vetas tobáceas decimétricas que aparecen en torno a los 70 m de profundidad, tienen cierta continuidad lateral y quimismo peculiar.

El **acuífero profundo** se desarrolla en las facies Puente Runel, en relación con el nivel de saturación regional, en torno a los 60 metros de profundidad. En esta zona se encuentra desconectado hidráulicamente del acuífero superficial, observándose niveles que funcionan como “acuífero colgado” en, al menos, siete sondeos que intercomunican las distintas formaciones.

El principal requerimiento para llevar a cabo operaciones de recarga artificial es la disponibilidad de agua para recargar. De este modo se ha optado por estudiar el **carácter del río Voltoya** desde un punto de vista **hidrológico** para satisfacer las necesidades con garantía y la peligrosidad a la que se ven sometidas las estructuras ante el riesgo de inundación.

El río Voltoya hasta su confluencia con el Eresma funciona como una red de drenaje rápida, como corresponde a un cauce cuya cuenca de recepción se encuentra en materiales cristalinos (gradiente medio de 1,7 %). Las estaciones de aforo de la CHD no presentan un registro de datos suficientemente largo para estudiar la disponibilidad hídrica en el pasado, por tanto esta queda fuertemente condicionada por los períodos de sequía.

El caudal correspondiente a la máxima avenida ordinaria (MAO) es el equivalente al período de retorno de 5 años, es decir $Q_{MAO} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. El principal problema se presenta cuando la avenida máxima va acompañada de inundaciones en el acuífero. La estimación de los **caudales máximos de avenida** en el punto del cauce del río Voltoya en el que está ubicado el **talud de recarga artificial** alcanzan los $300 \text{ m}^3/\text{s}$ en un período de retorno de 50 años, caudal suficiente para malograr definitivamente gran parte de las estructuras de obra.

Los ríos presentan un carácter ganador o conservativo al discurrir sobre Facies Cuestas, exceptuando el extremo sur de la *Cubeta*, donde puntualmente es perdedor. Este carácter ha sido deducido por el estudio de su funcionamiento hidrogeológico, datos de aforos secuenciales y técnicas hidroquímicas, que han permitido determinar el carácter de los ríos. En cuanto a las **relaciones río-acuífero**, el drenaje del acuífero ha sido calculado por cálculos darcinianos, resultando $464 \text{ m}^3/\text{día}$ por el río Voltoya para una situación de “aguas altas”, que bien puede estar inducida por la recarga artificial, y $1.276 \text{ m}^3/\text{día}$ para el Eresma en una situación análoga (2,75 veces más alta). La mayor parte del drenaje del acuífero se produce por descargas difusas, quedando las fuentes y manantiales limitados a zonas de rebosamiento del paleorrelieve (paleocubetas

adyacentes a los cauces cuyo nivel de desbordamiento es vertiente hacia el este, drenes o niveles de terrazas colgados).

Se han estudiado los balances hídricos preexistentes, realizado un análisis de los datos climáticos de las estaciones más cercanas y cerrado un balance hídrico para la Cubeta de Santiuste dentro de una horquilla de valores delimitada por la variabilidad de todos los parámetros en el período de estudio (de 1965 a 2002 para los datos climáticos y de 1999 a 2003 para el cierre del balance).

Los recursos renovables estimados para el año hidrológico 2002/03, correspondiente al primer ciclo de recarga artificial, oscilan en torno a 0,96 hm³/año. Este volumen resulta superior al calculado en 1999 por el MAPA, que era 0,7 hm³/año, debido a factores tales como la entrada de agua para abastecimiento urbano desde el exterior del sistema, un considerable incremento en los regadíos, un año de carácter climatológico húmedo y de las operaciones de recarga artificial (AR) durante 148 días.

El estudio del funcionamiento del sistema antes y durante las operaciones de AR se ha analizado mediante la recopilación de **cartografías hidrogeológicas** previas de 1990 y 1999, la elaboración de nuevas cartografías en situación de aguas bajas (septiembre de 2002) y altas (marzo de 2003) y de varios perfiles hidrogeológicos. En las nuevas cartografías las líneas de flujo presentan una orientación NE-SO, con un gradiente hidráulico cercano al 5 ‰ en la mitad occidental en septiembre de 2002, que disminuye al 3 ‰ en la mitad oriental (sector Este).

Se han detectado dos divisorias hidrogeológicas. La primera, ya cartografiada con anterioridad, está constituida por un afloramiento de margas (loma del Cuerno de la Revilla) longitudinal de dirección N-S y casi dos kilómetros de longitud de afloramiento. Separa el acuífero este del oeste, prolongándose en la misma orientación en la zona fosilizada por arenas. Al norte de ésta, se ha detectado otra divisoria hidrogeológica ligeramente perpendicular a la anterior y coincidente más o menos con el trazado de la carretera de Villagonzalo de Coca a Coca. La zona delimita además al desagüe del sistema fluvial del sector Este, actualmente fosilizado, que desembocaba en el río Voltoya a través de la cacera de Betaya.

El **perfil hidroestratigráfico a lo largo del caz de recarga artificial** permite diferenciar unas zonas en las que el acuitardo se encuentra a escasa profundidad bajo el dispositivo, constituyendo lo que se ha denominado “superficies de infiltración inefectiva”. El caz atraviesa el acuífero oeste por su lateral oriental, lo que impide la progresión lateral del bulbo de humidificación, que encuentra un límite físico por su sector este (el acuitardo terciario), circulando hacia el oeste aunque lo haga “contrasentido” con las líneas de flujo de las aguas subterráneas (vid. Cartografía hidrogeológica en las Figs. 2.41 y 2.42).

El **modelo analógico** confirma el funcionamiento supuesto del acuífero, que puede ser sintetizado como un “sistema de cubetas en cascada”. Puede ser además una herramienta de interés para el diseño de estructuras, planificación y gestión de las operaciones de recarga artificial (AR), ya que permite conocer los niveles de transferencia, llenado y desbordamiento, las zonas a través de las que se produce el drenaje del acuífero de forma natural, etc.

En cuanto a la información obtenida de la **respuesta del acuífero tras un ciclo de recarga artificial**, se ha recopilado toda la información descriptiva posible del dispositivo, y del desarrollo del primer ciclo de AR, mediante encuestas y datos puntuales de aforo del caudal derivado del río Voltoya en este ciclo (ya que, por entonces, el dispositivo carecía de caudalímetro a la entrada). El resultado de la pesquisa desprende los siguientes datos: el dispositivo estuvo funcionando durante 148 días (entre los días 67 y 214 del año hidrológico), con tres días de parada, lo que representa un total de 3.490 horas. El caudal instantáneo medio derivado fue controlado por la comunidad de regantes y la CHD, y oscilaba entre 150 y 600 l/s. Los aforos realizados en el caz de AR desprendieron cifras en torno a 310 l/s. El volumen derivado estuvo entre **3,77 y 4,03 hm³** (conviene recordar que fue un año hidrológico especialmente húmedo).

Para el seguimiento de la **evolución del bulbo de humidificación** fue establecida una red de recarga (RCR), compuesta por 38 puntos de agua localizados en las inmediaciones del caz. Su seguimiento ha permitido deducir cómo ha prosperado la recarga artificial en este ciclo, aportando información para la mejora de la efectividad del dispositivo. Además ha permitido detectar nuevos umbrales y divisorias de aguas subterráneas en zonas hasta ahora desconocidas, como ocurre junto a la cabecera del dispositivo, con una divisoria cercana por el este.

Se ha desarrollado la metodología del WTF, introduciendo dos procedimientos de cálculo diferentes. El primero ha sido designado **volumétrico algebraico (WTF.VA.)**. Consiste en calcular diferencias volumétricas entre las superficies freáticas para el período de estudio mediante operaciones de álgebra de mapas. Calculado el volumen de suelo de la diferencia de dos mallas sucesivas en el tiempo, se multiplica por la porosidad eficaz ponderada, obteniendo así el volumen de agua subterránea almacenada.

El segundo método, que se ha denominado **volumétrico-estadístico (WTF.VE.)**, se basa en la determinación de la media aritmética de todos los nodos de la malla del nivel del agua en cada fecha de medida, mediante el tratamiento estadístico de los datos. En este caso se calcula el volumen almacenado entre el basamento (acuitardo) y la capa freática para una cota media determinada.

Aunque ambos métodos parecen similares *a priori*, los resultados varían entre límites relativamente anchos, como consecuencia de los errores inherentes a los interpoladores automáticos, a la irregularidad del sustrato, a la morfología irregular de la capa freática en régimen influenciado y a la heterogeneidad y anisotropía del acuífero.

Las series de datos del volumen almacenado y de la elevación del nivel freático medio presentan una tendencia más o menos regular, homogénea y creciente. Al final del período de recarga artificial comienzan a adquirir forma asintótica. Su relación incremental nivel freático medio-volumen almacenado no conserva relaciones de proporcionalidad, y presenta ciertas anomalías. El hecho es atribuible a la morfología del acuífero, su heterogeneidad y anisotropía, y a la influencia de factores externos, por ejemplo la capacidad de infiltración se ve mermada por efecto de la temperatura y las heladas (la congelación de la superficie del terreno por efecto de las heladas disminuye la capacidad de infiltración), así como por la entrada de aire en el acuífero.

Hablando de resultados de cálculo, considerando una superficie de infiltración efectiva en el sector occidental de **7,128 km²**, correspondiente a la zona de influencia

del bulbo de humidificación, la **infiltración media** por m^2 de superficie oscila entre **140,29 y 188,55 l/m^2** o bien entre **0,140 y 0,189 $\text{m}^3/\text{año}/\text{m}^2$** . Con este volumen se ha logrado un ascenso del nivel freático medio en la zona de influencia del bulbo de humidificación de **6,92 a 4,25 m** de profundidad media de la capa freática durante el primer ciclo de AR (incluyendo la fracción de agua de lluvia y el aire retenido en el subsuelo (*efecto Lisse*)).

La **superficie de oscilación** oscila entre **4,74 y 0,06 m**, con un intervalo medio de **2,67 m** para una variación de almacenamiento entre **0,933 y 1,344 $\text{hm}^3/\text{año}$** durante el período de AR.

Los sectores con mayor **potencialidad de almacenamiento** son las inmediaciones de Santiuste, el occidental-central de la cubeta y la zona del *Pinar Nuevo* de Ciruelos de Coca. Las zonas con mayor **riesgo de inundación** han sido deducidas por operaciones de álgebra de mapas y se encuentran al sur del Pinar Nuevo.

Se ha calculado la **variación en el almacenamiento** de agua en el acuífero para el año hidrológico 2002/03. Aunque los resultados varían de acuerdo con el método empleado, el resultado es de aproximadamente **3,00 hm^3** para la totalidad de la cubeta (**42,19 km^2**). Se ha calculado la disociación entre recarga natural y AR, restando la infiltración natural media al total. Resulta así una variación máxima en el almacenamiento como consecuencia de la recarga artificial entre **1,623 y 2,073 $\text{hm}^3/\text{año}$** .

El **déficit** acumulado inicial (4 hm^3) fue casi recuperado en el primer ciclo de recarga artificial, que aportó al acuífero cerca de 2 hm^3 . Previsiblemente el volumen recargado permitirá aumentar el módulo interanual al término del segundo ciclo, lo que requiere una mayor organización en la gestión mediante sistemas de organización como la concentración parcelaria.

En vista de estos resultados numéricos, se abre una puerta que posibilitará **aumentar la disponibilidad de recursos hídricos y su uso**, viabilizando opciones tales como la implantación de nuevos regadíos o el empleo de recursos hídricos para objetivos medioambientales. Entre estos últimos cabe destacar la recuperación de humedales degradados aplicando técnicas de recarga artificial específicas.

La elevada dependencia de la efectividad del dispositivo y la meteorología induce a considerar la necesidad de instalar dispositivos complementarios que minimicen el efecto adverso de las heladas, entradas de aire, génesis de domos en la superficie piezométrica, etc. En sentido contrario, las zonas con mayores descensos durante la época de riego o con mayor concentración de captaciones operativas deben ser objetivos prioritarios de recarga artificial. Estas apreciaciones dan paso a las **técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT)** como alternativas para combatir los impactos detectados y mejorar la eficiencia de/l/los dispositivo/s.

Para ello debe tenerse en cuenta al planificar las operaciones de AR que en la zona de estudio coexisten fenómenos hidrogeológicos de índole local y regional interrelacionados, así como entre el acuífero superficial y profundo, como es el caso de los sondeos que intercomunican distintos acuíferos. Por tanto, cualquier **tratamiento** debe ser **integral**.

Con los datos disponibles en la actualidad, el volumen de agua de **almacenamiento óptimo** (considerando una “profundidad de alerta” media de 2 metros, y coeficientes de almacenamiento de 0,05 para las facies aluviales y lagunares y de 0,1 para las facies eólicas) asciende a **19,001 hm³** a primeros del año hidrológico 2003/04. Queda por tanto un déficit acumulado de 2 hm³ con respecto a la situación de 1999, habiendo aumentado los recursos renovables a 1 hm³ con respecto a esa fecha.

El empleo de herramientas GIS resulta un método adecuado para la **división de la zona de estudio en unidades homogéneas**. Para tal cometido se ha elaborado un concepto práctico, que son las unidades hidroambientales (UHAs), que han sido definidas como: “zonas o sectores homogéneos en que puede ser dividido un territorio de acuerdo con varios criterios gestionados por técnicas GIS”. Estas unidades requieren el uso de una serie de coberturas temáticas vectoriales georreferenciadas, si bien pueden permitir el empleo de cartografías ráster. La UHA tiene por tanto una importante componente de índole hidrogeológica, tecnológica y socioeconómica. Su información es altamente expresiva y sirve, además, como herramienta de apoyo para la toma de decisiones.

Se han definido cuatro UHAs en la Cubeta, que corresponden en líneas generales a cuadrantes septentrional y meridional occidental y oriental. Del mismo modo estas UHAs pueden ser divididas en dos nuevas unidades en sentido norte-sur por la presencia de drenes y discontinuidades tectónicas.

De este modo una UHA se convierte en una subdivisión de un territorio, en un fichero digital relacionado con una importante cantidad de información incorporada, punto de partida para cualquier actuación en el mismo y en la unidad de gestión ante las operaciones de recarga artificial de acuíferos en una zona determinada.

Como síntesis de toda la información analizada, los objetivos operacionales propuestos y los procedimientos metodológicos empleados, a continuación se extractan los resultados numéricos de los cálculos desarrollados a lo largo de este Bloque.

DATOS Y CÁLCULOS NUMÉRICOS

Coordenadas extremos poligonal envolvente zona de estudio:

- Xmin: 367.000
- X Máx: 372.600
- Y min: 4.555.000
- Y Máx: 4.571.000
- Espaciado mallas: 100 m.

Superficies planimetradas:

- Superficie de la poligonal envolvente del área de estudio: **42,19 km²**. Excluyendo el afloramiento del Cuerno de la Revilla: **41,10 km²**.

SECTOR	OCCIDENTAL	ORIENTAL
Superficie afloramientos permeables (km ²)	28,687	12,415
Superficie de infiltración efectiva (km ²)	20,496	7,775
Zona de influencia del bulbo de humidificación (km ²)	7,128	4,64

Tabla 2.46. Superficies empleadas para los diferentes cálculos.

Datos topográficos:

- La cota media de la superficie topográfica zona de estudio total: **780,59 msnm**
- Nivel medio del terreno en el acuífero oeste (afloramientos permeables): **783,26 m.**
- La cota media de la superficie de infiltración efectiva del sector Oeste en el primer ciclo: **789,85 m.**

Directrices tectónicas elipsoide deformación zona de estudio:

- Orientación de máxima compresión (δ_1): N128 a 138E (NO-SE).
- Orientación de esfuerzos distensivos (δ_3): N38 a 48E.

Índices geomorfológicos:

- **Índice gradiente del Talveg:** entre 3 y 310 unidades SL. en Voltoya y entre 0,3 y 352,8 u.S.L. en Eresma.
- **Índice de sinuosidad de escarpes:** 1,32 S_{mf} para el Voltoya y 1,08 para el Eresma.
- **Sinuosidad media:** 1,32 para el trazado del río Voltoya en la zona de estudio y de 1,08 para el Eresma, resultando una media de 1,21.

Parámetros hidrológicos:

- Gradiente medio río Voltoya: 1,7 %.
- Caudal avenida máxima ordinaria, período de retorno de 5 años: **100 m³/s.**
- Caudal avenida máxima ordinaria, período de retorno de 50 años: **300 m³/s.**



- Volumen derivado río Voltoya primer ciclo de AR: de **3,77 a 4,03 hm³**.

Régimen concesional primer ciclo de recarga artificial (AR).

- Disponibilidad máxima de agua procedente del río Voltoya: 6 hm³/año.
- El caudal medio del caz durante el primer ciclo de recarga artificial: **310 l/s**.
- Duración ciclo con la derivación operativa: 3.490 horas.
- Caudal derivado del río Voltoya, primer ciclo: **3,895 hm³**.

Cálculos darcinianos, relación río-acuífero, febrero de 2003.

- **Salidas del acuífero al río Voltoya: 464 m³/día.**
- **Salidas del acuífero al río Eresma: 1.276 m³/día** (2,75 veces mayor).
- N° de manantiales inventariados talud margen derecha río Voltoya: 13.
- N° de manantiales inventariados talud margen derecha río Eresma: 2.

Balance hídrico:

Los resultados finales se presentan en la Tabla 2.47:

ENTRADAS	Infiltración directa del agua de lluvia	De 2,825 a 3,287
	Infiltración a través de la escorrentía superficial	hm ³ /año
	Importaciones	0,18 (0,20)
	Entradas por arroyos	0,056
	Retornos de riegos	0,26 a 0,30 (0,28)
RECARGAS	Recarga artificial del acuífero	¿??0 hm ³ /año
	Flujo subsuperficial y manantiales entrantes	0,061 hm ³ /año
SALIDAS	Salidas por bombeo:	
	Regadíos	2,649 a 2,966 hm ³ /año
	Abastecimiento Urbano	(Importaciones)
	Abastecimiento Industrial	0,165 hm ³ /año
	Abastecimiento ganadero	0,154 hm ³ /año
	Salidas por cauces superficiales.	0*
	Percolación hacia el acuífero profundo.	0,762 a 1,107 (1,0) hm ³ /año
DESCARGAS	Descargas Manantiales y rezumes	De 0,241 (0,3) a 0,677 hm ³ /año
	Drenaje subsuperficial y subterráneo hacia el norte de la cubeta	0,039 hm ³ /año
TOTAL	E (de 3,382 a 3,817) + (AR) - S (De 4,010 a 5,108)= ΔV /AR = volumen de entradas por recarga artificial.	De - 0,628 a -1,291 hm ³ /año Media = - 0,959 3,422- 4,307= 0,885 hm ³

Tabla 2.47. Resumen: Datos disponibles para la resolución de la ecuación general del balance hídrico.

- Recursos renovables año hidrológico 2002/03 = 0,96 hm³/año.



Cartografía hidrogeológica:

- Gradiente hidráulico acuífero oeste: 5 ‰.
- Líneas de flujo acuífero este: 3 ‰.

Parámetros hidráulicos acuífero superficial:

- La permeabilidad vertical oscila entre **0,64** (MAPA, 2003) y **3 m/día** (MAPA, 1999a).
- Permeabilidad entre 2 y 30 m/día.
- Coeficiente de almacenamiento: de 0,11 a 0,28 con un promedio del 18,6% (MAPA, 1999a), y 10% (MAPA, 2003).

Parámetros hidráulicos acuitardo:

- Permeabilidad: de $1.1 \cdot 10^{-6}$ y $9.8 \cdot 10^{-7}$, con velocidades de infiltración inferiores a $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/día.

Dispositivo de infiltración:

- La superficie de infiltración inicialmente calculada para el dispositivo de recarga artificial: **33.300 m²**.
- Longitud del caz en el primer ciclo: **10.667 m**.
- Longitud de infiltración efectiva: **7.640 m**.
- Longitud de infiltración inefectiva: **3.027 m**.
- Superficie de infiltración del caz efectiva: **23.850 m²**.

Volumen acuíferos:

- El volumen calculado del acuífero mixto: **317.041.552 m³**.
- Volumen calculado del acuífero eólico: **181.958.951 m³**.
- Volumen calculado del acuífero fluvial: **135.082.601 m³**.

Volumen almacenado febrero de 2003:

- Volumen saturado de acuífero superficial eólico considerando una “profundidad de alerta” media de 2 metros: **122.471.511 m³**.
- Capacidad total de agua en el acuífero: **24,95 hm³**.
- Capacidad de almacenamiento óptimo del acuífero, excluyendo el acuitardo y considerando una “profundidad de alerta” de 2 metros: **19,001 hm³**.
- Volumen almacenado en el acuífero en facies eólicas: **10,65 hm³**.
- Volumen almacenado en el acuífero en facies fluviales: **6,5 hm³**.
- Volumen almacenado total: **17,15 hm³** (una fracción importante corresponde a aire, mientras que otra se encuentra por encima de la profundidad de alerta).
- Volumen adicional de acogida: **2 hm³**.

Variación almacenamiento de agua en el acuífero en el año hidrológico 2002/03:

- Total: **3,006 hm³**.
- Procedente de las operaciones de AR: de **1,623 a 2,073 hm³/año**.



- Fracción del volumen infiltrado procedente de recarga del agua de lluvia de forma natural: de **1,623 a 2,073 hm³/año (53,99 al 68,96 % del almacenamiento, del 8,99 a 11,48% de la precipitación total y del 66,49 al 84,94 % de la lluvia útil).**
- Volumen almacenado en el acuífero durante el primer ciclo de recarga artificial en la superficie ocupada por afloramientos permeables: de **0,933 a 1,383 hm³ de 31,04 a 46,01 %).**
- Diferencia volumétrica entre 23 de diciembre de 2002 y 24 de marzo de 2003 (máximo almacenamiento registrado) en el acuífero oeste: 2,121 hm³.
- Volumen procedente de AR en este período: de **0,933 a 1,344 hm³.**
- Transferencias totales a acuífero profundo: 1,107 hm³/año.

Rango de infiltraciones:

- Superficie de infiltración efectiva, sector occidental (7,128 km²): de 140,29 a 188,55 l/m² o bien entre 0,140 y 0,189 m³/año/m².
- Tasa de infiltración en el acuífero oeste: de 43,54 a 86,75 l/m² o bien entre 0,43 y 0,87 m³/año/m².
- Tasa de infiltración zona de influencia del bulbo de humidificación del sector oeste (7,128 km²): de 140,29 a 188,55 l/m² o bien de 0,140 a 0,189 m³/año/m².

Cálculos espesor ZNS, septiembre de 2002:

- Espesor medio de la ZNS para la *superficie de infiltración efectiva*: **7,27 m.**
- Espesor medio de la ZNS en el sector occidental: **6,92 m.**
- Espesor de la ZNS en el sector oriental: **7,62 m.**
- Espesor medio del acuífero (ZNS+ZS) es **8,87 m.**
- Ascenso del nivel freático medio resultante: de 6,92 a 4,25 m.

Superficie de oscilación:

- Oscilación máxima zona RCR: de 0,06 m a 4,74 m.
- Intervalo de oscilación medio: > 2,67 metros.
- Variación de almacenamiento: de 0,933 a 1,344 hm³/año.

ZNS:

- Espesor medio ZNS totalidad de la envolvente de la zona de estudio: 7,27 m.
- Espesor medio ZNS sector occidental: 6,92 m.
- Nivel freático medio, situación de aguas altas: **4,25 metros.**
- Intervalo de la cota de la capa freática: de 749,7 a 811,3 msnm (61,51 m) en febrero de 2003.
- Cota media de la capa freática: 776,87 m en febrero de 2003.



OBJETIVO "BUEN ESTADO DE LAS AGUAS" (BEDLA)

ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Principio 2 .- Los recursos naturales de la Tierra, incluidos el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras mediante una cuidadosa planificación u ordenación, según convenga.

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano.
Estocolmo, 1972.



ÍNDICE DEL BLOQUE 3

ÍNDICE DEL BLOQUE 3 407

1. INTRODUCCIÓN	415
1.1. OBJETIVOS	416
1.2. MARCO TEÓRICO	417
2. HILO CONDUCTOR	417
3. MATERIALES Y MÉTODOS	419
3.1. MATERIALES	419
3.2. MÉTODOS	420
3.2.1. Protocolo de muestreo	421
3.2.2. Determinaciones analíticas	422
3.2.2.1. <i>Determinación de parámetros inestables in situ</i>	422
3.2.2.2. <i>Análisis en laboratorio</i>	423
3.2.3. Caracterización hidroquímica de las aguas	426
3.2.4. Análisis hidroestadístico	427
3.2.4.1. <i>Comprobación de la calidad de los análisis</i>	428
3.2.5. Caracterización geoquímica del acuífero (suelos)	429
3.2.6. Modelización Hidrogeoquímica	429
3.2.7. Determinación de ambientes hidrogeoquímicos	433
4. ESTADO DEL ARTE	434
5. FRACCIÓN LÍQUIDA: EL AGUA	447
5.1. PUNTOS DE AGUA DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO	447
5.1.1. Definición de la Red de Control de la Calidad (RCC)	449
5.1.2. Polos fríos del sistema	450
5.1.3. Red de control de la hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)	453
5.1.4. Red de control de la hidroquímica Fase operacional (RCH-2003)	453
5.1.5. Puntos adecuados para la elaboración de perfiles hidroquímicos y determinación de ambientes hidrogeoquímicos. Fase postoperacional	453
5.1.6. Humedales del Complejo de Coca-Olmedo	454
5.2. FASES DE MUESTREO Y ANÁLISIS <i>IN SITU</i>	455
5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LA FASE ACUOSA	459
5.3.1. Caracterización de los “ <i>polos extremos o fríos</i> ”	459
5.3.2. Red de control de la hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)	468
5.3.2.1. <i>Pozos, pozos-sondeo, minisondeos y sondeos de profundidad inferior a 75 m</i>	471
5.3.2.2. <i>Sondeos de profundidad comprendida entre 75 y 150 m</i>	502
5.3.2.3. <i>Sondeos profundos de más de 150 m</i>	505
5.3.2.4. <i>Caracterización global. Fase preoperacional</i>	512
5.3.3. Fase operacional (RCH-2003)	516
5.3.3.1. <i>Pozos, pozos-sondeo, minisondeos y sondeos de profundidad inferior a 50 m</i>	519
5.3.3.2. <i>Sondeos de profundidad superior a 50 m</i>	546
5.3.4. Fase postoperacional. Caracterización de ambientes	548
5.3.4.1. <i>Captaciones de profundidad inferior a 50 m</i>	549
5.3.4.2. <i>Captaciones de profundidad superior a 50 m</i>	557
5.3.5. Elaboración de perfiles hidroquímicos para la determinación de ambientes	559
5.3.6. <i>Humedales del Complejo de Coca-Olmedo</i>	575
5.3.7. Los procesos contaminantes. Distribución y evolución previsible	582
5.3.7.1. <i>Contaminación por nitratos</i>	584
5.3.7.2. <i>Contaminación por arsénico</i>	588
5.3.7.3. <i>Contaminación por vectores orgánicos</i>	589
5.3.7.4. <i>Contaminación manifestada por conductividades altas</i>	590
5.3.7.5. <i>Contaminación por cloruros</i>	591



5.3.8.	Pautas de reacción constatadas en la fracción líquida	592
5.3.9.	Variaciones en los índices hidrogeoquímicos y relaciones iónicas	592
5.3.10.	Variaciones deducidas del estudio de cartografías de isocontenidos	597
5.3.11.	Variaciones deducidas del estudio de cartografías de isorrelaciones iónicas	601
5.3.12.	Resultados	602
6.	FASE SÓLIDA: EL SUELO. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO	609
6.1.	MUESTREO DE LA FASE SÓLIDA	609
6.1.1.	Testificación detallada	609
6.1.2.	Técnicas analíticas	610
6.1.2.1.	<i>Análisis geoquímicos de la fracción sólida</i>	610
6.1.2.2.	<i>Análisis granulométricos</i>	612
6.1.2.3.	<i>Análisis morfométricos y clastométricos</i>	617
6.1.2.4.	<i>Caracterización textural y estructural de los sedimentos</i>	618
6.1.2.5.	<i>Interpretación de los resultados</i>	625
6.1.3.	Estudio de la petrografía en lámina delgada	627
6.1.3.1.	<i>Minerales mayoritarios</i>	629
6.1.3.2.	<i>Fracción pesada</i>	630
6.1.3.3.	<i>Alteritas</i>	630
6.1.4.	Capacidad de intercambio de bases y cationes de las arcillas	632
6.1.5.	Capacidad de autodepuración del terreno. Alternativas de actuación	634
7.	PREVISIÓN DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-SUELO MEDIANTE CÓDIGOS DE MODELIZACIÓN	636
7.1.	CÁLCULOS DE ESPECIACIÓN-SOLUBILIDAD MEDIANTE CÓDIGOS DE MODELIZACIÓN	636
7.2.	PREVISIÓN DE LAS PAUTAS DE REACCIÓN	643
7.2.1.	Aproximación al conocimiento de los procesos de interacción agua-suelo	643
7.2.1.1.	<i>Comparación entre las aguas de recarga y los polos fríos</i>	643
7.2.1.2.	<i>Comparación entre las aguas de riego en la fase preoperacional y después del primer ciclo de recarga</i>	645
7.2.2.	Pautas de reacción y transferencia	651
7.3.	DETERMINACIÓN DE AMBIENTES HIDROGEOQUÍMICOS	655
7.4.	EVOLUCIÓN PREVISIBLE DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS TRAS LAS OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL (AR)	661
8.	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS DEDUCIDAS DE LA HIDROGEOQUÍMICA	672
9.	CONCLUSIONES DEL BLOQUE 3	674

BLOQUE 3. ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 3.01. Esquema argumental del Bloque 3: “Aspectos cualitativos de la interacción agua-suelo.”	418
Fig. 3.02) y 3.03). Equipo empleado en la determinación de parámetros inestables in situ. El capot o el tejado del vehículo sirvieron de “laboratorio móvil”.	425
Fig. 3.04). Equipo empleado en la determinación de parámetros inestables in situ.	425
Fig. 3.05. Esquema operacional de las distintas etapas que permiten conocer las pautas de reacción previsibles como consecuencia de procesos de interacción entre aguas de distintas composiciones y suelos/rocas en unas condiciones determinadas (tomado de Buil y Fdez. Escalante, 2001).	432
Fig. 3.06 a). Gráfico en el que se comparan el tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes de los poros. Fuente: ITGE, 1998.	441
Fig. 3.06 b). Disminución del contenido en bacterias de un acuífero en función del tipo de material. Tomado de Weaver et al, 1978, en Crane & Moore, 1984.	443
Fig. 3.07 a). Gráfico que muestra la supervivencia de varios tipos de bacterias en aguas subterráneas. Fuente: Bitton et al, 1983.	445
Fig. 3.07 b). Gráfico que muestra la supervivencia en aguas subterráneas de dos tipos de virus. Fuente: Bitton et al, 1983.	445
Fig. 3.08 a). Fotografía de la Estación completa 2502 del INM. Santiuste de San Juan Bautista.	451
Fig. 3.08 b). Cabecera del caz de recarga artificial u “Hongo”, en Santiuste de San Juan Bautista.	451
Fig. 3.08 c). Zona de descarga del acuífero “Los Prados del Amor”.	451
Figs. 3.09 a) y b). Dos aspectos del Polo frío Suroeste (manantial y fuente de la Torrecilla). con transferencia subterránea a través del colector del Estanquillo y bajo la fuente. Sept. de 2002.	452
Figs. 3.10 a) y b). Polo frío oeste. Entrada de agua al sistema por un collado entre las colinas que delimitan la Cubeta por el oeste, con transferencia subterránea por el collado del “Alto del Sanchón.” Julio de 2002.	452
Fig. 3.11. Mapa de situación de los puntos considerados de interés hidrogeoquímico en la zona de estudio. Redes de control y polos fríos (página siguiente).	455
Fig. 3.12. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier con representación de los polos fríos del sistema.	465
Figs. 3.13 a) y b). Hidrograma de Stiff con representación de los polos fríos del sistema.	467
Figs. 3.14 y 3.15. Hidrogramas de Piper-Hill-Langelier y Stiff, respectivamente, para el polo frío medio... ..	468
Fig. 3.16. Representación en un diagrama de Piper de todas las muestras de la RCH 99.	471
Fig. 3.17. Representación en un diagrama de Piper de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad inferior a 75 m.	473
Figs. 3.18 a) a e). Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff. Determinaciones de 1999 (fase preoperacional), captaciones de profundidad inferior a 75 m.	487
Fig. 3.19. Representación en un diagrama de Piper de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad inferior a 75 m.	488
Fig. 3.20. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad entre 75 y 150 m.	488
Fig. 3.21. Representación en un diagrama de Piper de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad superior a 150 m.	488
Fig. 3.22. Diagramas de Scatter Conductividad-cloruro.	489
Fig. 3.23. Diagramas de Scatter Conductividad-sulfato.	490
Fig. 3.24. Diagramas de Scatter Conductividad-nitrato.	490
Fig. 3.25. Diagramas de Scatter Conductividad-bicarbonato+carbonato.	491
Fig. 3.26. Diagramas de Scatter Conductividad-sodio.	491
Fig. 3.27. Diagramas de Scatter Conductividad-sodio+potasio.	492
Fig. 3.28. Diagramas de Scatter Conductividad-calcio.	492
Fig. 3.29. Diagramas de Scatter Conductividad-magnesio.	493
Fig. 3.30. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad entre 75 y 150 m.	505
Fig. 3.31. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad superior a 150 m.	509
Fig. 3.32. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras analizadas (Fdez. Escalante, 2002b).	514



Fig. 3.33. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de todas las muestras de la RCH 03 (etapa operacional).	525
Figs. 3.34 a) a e). Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff.	530
Fig. 3.35. Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff sobre una cartografía espacial de la zona de estudio (página siguiente).	531
Fig. 3.36. Diagramas de Scatter para la confrontación del parámetro conductividad con algunos aniones y cationes mayoritarios Conductividad-cloruro.	535
Fig. 3.37. Diagramas de Scatter Conductividad-sulfato.	535
Fig. 3.38. Diagramas de Scatter Conductividad-nitrato.	536
Fig. 3.39. Diagramas de Scatter Conductividad-bicarbonato+carbonato.	536
Fig. 3.40. Diagramas de Scatter Conductividad-sodio.	537
Fig. 3.41. Diagramas de Scatter Conductividad-calcio.	537
Fig. 3.42. Diagramas de Scatter Conductividad-magnesio.	538
Figs. 3.43 a) – d). Histogramas de frecuencias de la abundancia relativa de ión nitrato, hierro total, oxígeno disuelto y del parámetro conductividad respectivamente en las muestras analizadas.	556
Fig. 3.44. Mapa con la posición de los perfiles hidroquímicos realizados a escala 1:40.000 (página siguiente).	561
Fig. 3.45. Cartografía con la ubicación de los humedales que cuentan con información relativa a su quimismo. Escala 1:110.000.	580
Fig. 3.46. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas de los humedales.	581
Figs. 3.47 a) y b). Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff.	581
Figs. 3.48 a) y b). Cartel informativo de la presencia de arsénico en las aguas subterráneas en concentraciones susceptibles de provocar arsenicosis.	583
Fig. 3.49. Relación entre la profundidad de las aguas subterráneas y la concentración en nitratos, sulfatos y arsénico en una zona regable abonada con estiércol. Las líneas verticales discontinuas muestran el límite de potabilidad en USA. La zona sombreada corresponde a la zona de desnitrificación (Tomado de Böhlke, 2002, modificado por Van Beck et al, 1989).	589
Fig. 3.50. Ordenamiento hipotético según el progreso del rejuvenecimiento de las aguas de acuerdo con la relación iónica correspondiente.	596
Fig. 3.51. Ordenamiento hipotético según el progreso del rejuvenecimiento de las aguas de acuerdo con la relación iónica elegida.	605
Fig. 3.52. Representación de la distribución de isolíneas de isorrelaciones iónicas magnesio-calcio en la Cubeta de Santiuste. La isolínea más gruesa corresponde al valor cero (verde). En azul se presentan las isolíneas de incrementos negativos y en negro de positivos. Esta relación se perfila de gran utilidad para detectar tendencias generales e incluso singularidades en la Cubeta de Santiuste, si bien habrá que comprobar su efectividad en escenarios análogos (Página siguiente).	605
Fig. 3.53. Distribución de las 19 muestras sólidas tomadas en el acuífero. En morado: muestras sometidas a ensayos granulométricos. En rosado: Muestras de arena superficiales con estudio geoquímico. En negro: muestras estudiadas por técnicas petrográficas sobre lámina delgada. Todas ellas han sido visualizadas en lupa binocular para el estudio de su textura. Escala 1:50.000 (página siguiente).	614
Fig. 3.54. Histograma de frecuencias para la población de muestras analizadas, considerando los principales intervalos clastométricos de la serie ASTM.	622
Figs. 3.55. y 3.56. Distribución de frecuencias normal y acumulada para la población de muestras analizadas, considerando los principales intervalos clastométricos de la serie ASTM.	623
Figs. 3.57 a 3.60. Estratificación cruzada de bajo ángulo típica de un sistema dunar en las terrazas de los ríos Voltoya, en los areneros de Coca, y del río Eresma, en las inmediaciones de Villeguillo.	625
Figs. 3.61 a), b) y c). Fotografías microscópicas con distintos aspectos de la muestra INV-245 1,3 m.	632
Fig. 3.62. Diagramas de estabilidad de los distintos ligandos ferrosos y fases en función del pH y eH del medio (tomado de Custodio y Llamas, 1983).	642
Fig. 3.63. Representación de las concentraciones de elementos mayores en las aguas de lluvia de la zona de estudio, las aguas de recarga y los polos fríos en un hidrograma de Schoeller modificado.	644
Fig. 3.64. Posición de los puntos de control con respecto al caz de recarga sobre la cartografía a escala 1:25.000 del IGN. Verde: RCH-99, Rojo: RCH-03. Estructura lineal: caz de recarga artificial. Escala aproximada: 1:60.000.	646
Fig. 3.65. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier para el estudio de la evolución hidroquímica de las aguas.	648
Fig. 3.66 a). Hidrogramas de Stiff para el estudio de la evolución hidroquímica de las muestras.	649
Fig. 3.66 b). Representación de las concentraciones de elementos mayores en las aguas de riego en las fases pre y operacional.	650



Figs. 3.67 a) a d). Principales procesos y reacciones constatados y supuestos que afectan a la hidroquímica de las aguas en el sector septentrional de la Cubeta de Santiuste (Perfiles hidroquímicos 1, 7, 11 y 15 respectivamente).....	656
Fig. 3.68. Diagramas de estabilidad del hierro disuelto en función de su actividad química en función del pH y Eh. Tomado de Pyne, 1995.	665
Fig. 3.69. Diagrama de estabilidad y equilibrio del manganeso en función del pH y Eh. Tomado de Pyne, 1995.	666
Fig. 3.70. Diagrama de estabilidad y equilibrio de las formas sulfurosas en función del pH y Eh. Tomado de Pyne, 1995.	667
Fig. 3.71. Niveles de carbonatos en acuífero en la margen derecha del río Voltoya. Inmediaciones del Puente Chico de Coca.	667
Fig. 3.72. Diagrama de estabilidad y equilibrio de las formas nitrogenadas en función del pH y Eh. (Pyne, 1995).	668
Fig. 3.73. Principales procesos que afectan a la hidroquímica del agua en experiencias de recarga artificial en humedales degradados. Modificado de Stuyfzand, 2002b.	671

BLOQUE 3. ÍNDICE DE TABLAS

Tablas 3.01) y 3.02). Metodología empleada para la determinación de los parámetros químicos en laboratorio (cationes, parámetros y aniones)	424
Tabla 3.03. Polos fríos. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	462
Tabla 3.04. a 3.06. Polos fríos. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.	462
Tabla 3.07. Polos fríos. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.	463
Tabla 3.08. a 3.10. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.	463
Tabla 3.11. Análisis estadístico de los resultados analíticos de los puntos de agua de la RCH99 (preoperacional) de profundidad inferior a 75 m.	472
Tabla 3.12. Captaciones de profundidad inferior a 75 m. Fase preoperacional. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	474
Tablas 3.13. a 3.15. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.	475
Tabla 3.16. Captaciones de profundidad inferior a 75 m. Fase preoperacional. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.	475
Tabla 3.17. a 3.19. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.	476
Tabla 3.20. Captaciones de profundidad inferior a 75 m adyacentes al caz de AR. Fase preoperacional. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	476
Tabla 3.21. a 3.23. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.	477
Tabla 3.24. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.	477
Tabla 3.25. a 3.27. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.	478
Tabla 3.28. Ordenamiento hipotético según el tiempo de residencia en el acuífero de las aguas de las captaciones (de acuerdo con la relación iónica correspondiente).	482
Tabla 3.29. Captaciones de 75 a 150 m de profundidad. Fase preoperacional. Análisis estadístico de los resultados analíticos. Fase preoperacional. Captaciones de 75 a 150 m de profundidad.	503
Tabla 3.30. Fase preoperacional. Captaciones de 75 a 150 m de profundidad. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	504
Tabla 3.31. a 3.33. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l. Dada la escasez de muestras, se ha omitido el cálculo en meq/l.	504
Tabla 3.34. Análisis estadístico de los resultados analíticos. Fase preoperacional (1999). Captaciones de profundidad superior a 150 m.	506
Tabla 3.35. Fase preoperacional (1999). Captaciones de profundidad superior a 150 m. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	507



Tabla 3.36 a 3.38. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.....	507
Tabla 3.39. Rangos de toxicidad por PSI de las aguas de riego según la FAO (en UNESCO, 1971).	510
Tabla 3.40. Parámetros estadísticos de la comparación entre las muestras de agua del período preoperacional. Concentración en mg/l.	511
Tabla 3.41. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	511
Tabla 3.42. a 3.44. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.....	512
Tabla 3.45. Equivalencia entre las numeraciones de la RCH 1999 (red de control del período preoperacional) y RCH 03 (red del período operacional).	516
Tabla 3.46. Equivalencia entre las numeraciones de la RCH 1999 (red de control del período preoperacional) y de nuevas captaciones cercanas a las anteriores integradas en la RCH 03 (red del período operacional) de distinta profundidad.	517
Tabla 3.47. Balance iónico de las muestras analizadas.	518
Tabla 3.48. Análisis estadístico de los resultados analíticos. Fase operacional, 2003. Captaciones de profundidad inferior a 50 m.	520
Tabla 3.49. Captaciones de profundidad inferior a 50 m. Fase operacional, 2003. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	522
Tabla 3.50. a 3.52. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.....	522
Tabla 3.53. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.....	523
Tabla 3.54. a 3.56. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.	523
Tabla 3.57. Análisis hidroestadístico de las muestras de agua. Fase operacional 2003. Captaciones de profundidad superior a 150 m.	546
Tabla 3.58. Fase postoperacional. Captaciones de profundidad inferior a 50 m. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	549
Tabla 3.59 a 3.61. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.....	550
Tabla 3.62. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.....	550
Tabla 3.63 a 3.65. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.	551
Tabla 3.66. Fase postoperacional. Captaciones de profundidad superior a 50 m. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	557
Tabla 3.67. a 3.69. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.....	558
Tabla 3.70. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.....	558
Tabla 3.71. a 3.73. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.	558
Tabla 3.74. Puntos elegidos para el trazado de perfiles con determinaciones hidroquímicas. La primera columna corresponde al perfil realizado, la segunda al n.º de inventario, las restantes, respectivamente, a coordenadas UTM, naturaleza, profundidad actual, medida del nivel del agua con respecto al nivel medio del terreno en verano de 2003, profundidad del muestreo y cota de las muestras en m.s.n.m.	565
Tablas 3.75. y 3.76. Inventario y determinación de parámetros inestables en los humedales del Complejo clasificados como “azules” con lámina de agua en verano de 2003.....	576
Tabla 3.77. Humedales de Complejo de Coca-Olmedo con determinaciones analíticas. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.	577
Tabla 3.78. a 3.79. Matrices de correlación con expresión del punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.	578
Tabla 3.80. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.....	578
Tabla 3.81 a 3.82. Matrices de correlación con expresión del punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.....	579
Tabla 3.83. Índices hidrogeoquímicos molales calculados para los puntos de la red de control RCH-1999 (etapa preoperacional).	595
Tabla 3.84. Índices hidrogeoquímicos molales calculados para los puntos de la red de control RCH-2003 (etapa operacional).	595
Tabla 3.85. Ordenamiento de las relaciones iónicas propuestas para el trabajo “en absoluto.” Fase preoperacional	596



<i>Tabla 3.86. Ordenamiento de las relaciones iónicas propuestas para el trabajo “en absoluto.” Fase operacional.....</i>	<i>597</i>
<i>Tabla 3.87. Localización de las muestras de suelos.....</i>	<i>611</i>
<i>Tabla 3.88. Análisis geoquímico de las muestras de suelos.....</i>	<i>612</i>
<i>Tabla 3.89. Muestras sometidas a análisis granulométricos, posición y propiedades relativas al punto de muestreo.</i>	<i>613</i>
<i>Tabla 3.90. Resultados de las granulometrías en las muestras analizadas.</i>	<i>614</i>
<i>Tabla 3.91. Muestras en las que se ha realizado un análisis granulométrico y parámetros inestables de la fracción líquida en el punto de muestreo. Además estas muestras han sido sometidas a análisis morfoscópico y granulométrico. Las muestras con las que se ha elaborado lámina delgado-pulida se presentan coloreadas.</i>	<i>618</i>
<i>Tabla 3.92. Resumen de la posición y características clastométricas de las muestras tomadas en sondeos.</i>	<i>619</i>
<i>Tabla 3.93. Resultado del análisis llevado a cabo calculando los principales parámetros clastométricos y análisis gráficos.....</i>	<i>621</i>
<i>Tabla 3.94. Posición de los sondeos muestreados y profundidad de las muestras con lámina delgada. Las determinaciones químicas corresponden a parámetros inestables del agua en la posición del muestreo (zona saturada).</i>	<i>628</i>
<i>Tabla 3.95. Contaje modal láminas delgadas. Componentes mayoritarios.</i>	<i>629</i>
<i>Tabla 3.96. Contaje modal láminas delgadas. Fracción pesada.</i>	<i>629</i>
<i>Tabla 3.97. Capacidad de intercambio catiónico de determinadas arcillas y minerales (en relación molar) con respecto a la superficie de contacto (en m²/g). Tomado de Dragun, 1985 (en Dragun, 1988).....</i>	<i>633</i>
<i>Tabla 3.98. Concentración en macroconstituyentes de los principales iones.</i>	<i>646</i>
<i>Tabla 3.99. Minerales primarios y secundarios susceptibles de reaccionar con el agua de recarga.</i>	<i>651</i>



BLOQUE 3. OBJETIVO “BUEN ESTADO DE LAS AGUAS” (BEDLA).

ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

1. INTRODUCCIÓN

Para un correcto aprovechamiento de las aguas subterráneas como recurso hídrico, es necesario conocer su calidad química. La calidad está determinada por el grado de adecuación de las aguas al uso específico previsto, así como por la prevención y/o resolución de problemas originados por procesos contaminantes que pueden volver inutilizable el recurso. De este modo, en el caso del abastecimiento es la relación entre la calidad del agua y su efecto sobre los consumidores. En el caso del riego es la relación entre la calidad del agua y las necesidades del regante, etc. (Fdez. Escalante, 2002b).

En el caso de la recarga artificial será la relación entre la calidad del agua originaria y la efectividad de las estructuras de recarga artificial.

La calidad de las aguas subterráneas está condicionada por las condiciones del acuífero, su litología, velocidad de circulación, calidad del agua que se infiltra, temperatura, presión, tiempo de residencia en el acuífero, grado de explotación del acuífero, presencia de procesos contaminantes, fenómenos de reciclaje de aguas, etc.

Los procesos de interacción agua-medio determinan dicha composición, en una serie de procesos dinámicos que se desarrollan a distintas velocidades, tanto en el espacio como en el tiempo. Por tanto, la composición del agua subterránea debe ser referida a un lugar y un período determinado. De ahí la afirmación “*las aguas subterráneas son un agente geológico habitual*” (Tóth, 1999).

Los objetivos de calidad son viables gracias a la potencial mejora de la calidad que proporciona la capacidad de autodepuración de los acuíferos, y a la gestión mediante técnicas que inciden en la mejora cualitativa del recurso, como es la MAR. Para ello parece conveniente limitar el uso de compuestos químicos para el tratamiento convencional (desinfección durante el pretratamiento del agua de recarga, etc.).

En este sentido, la recarga artificial se perfila como una técnica encaminada y adecuada para la consecución del *objetivo europeo* previsto para el año 2015, “*la obtención de agua potable de calidad*” o GS (*Good Status*), de acuerdo con la Directiva 2000/60/CE.

Este objetivo, designado en este trabajo BEDLA o “*Buen Estado De Las Aguas*”, da título al capítulo. Su desarrollo para el horizonte previsto puede llegar a ser considerado un tópico, solo el tiempo lo dirá. De cualquier modo su utilidad resulta incuestionable, ya que, se consiga o no el objetivo marcado por la CE, siempre podrán utilizarse los recursos con una visión unificadora e integradora que permita, por ejemplo, el empleo de aguas almacenadas en los acuíferos procedentes de operaciones



de recarga artificial (AR) para fines ambientales y paisajísticos, uso bastante extendido en países de marcada tradición de la técnica MAR y cultura medioambiental.

1.1. OBJETIVOS

La pretensión principal es obtener y tratar todos los datos hidroquímicos recopilados en la zona de estudio, con objeto de caracterizar las aguas y conocer los procesos de interacción agua-acuífero que resultan de las operaciones de recarga artificial en distintos períodos y zonas, así como avanzar en el conocimiento hidrogeológico del acuífero mediante la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas complementarias.

Al mismo tiempo se pretende caminar hacia el desarrollo de un planteamiento metodológico que conlleve una mejora cualitativa de las aguas subterráneas respecto a los procesos contaminantes previos, tanto en zona saturada como no saturada, y tanto sobre los vectores biológicos (algas, hongos, bacterias y virus) como sobre los inorgánicos (metales pesados, sales, etc.). Para ello se considera preciso recabar todos los datos precisos para el estudio de las aguas nativas o primigenias, las aguas de recarga artificial y los materiales sólidos con los que interactúan. Esta mejora responde a la fuerte preocupación suscitada en el área de estudio por la presencia de elementos nocivos en las aguas en concentraciones importantes, como puede ser el problema de los nitratos (se trata de una zona vulnerable), por la contaminación por arsénico en el agua superficial y en el agua procedente de sondeos profundos, así como por la salinización puntual en zonas con claros problemas de intrusión salina continental.

En este contexto, resulta preciso dilucidar que causas inciden negativamente en la calidad de las aguas subterráneas, especialmente tendiendo a la determinación de sinergismos que incrementen el riesgo o peligrosidad ante el deterioro cualitativo de las aguas durante las operaciones de AR. De este modo se contará con la información precisa para establecer unos estándares de calidad de las aguas de recarga artificial.

Por último se han determinado los parámetros inestables de todos los humedales del sistema con lámina de agua durante el verano de 1999, 2002 y 2003 del Complejo de lagunas salinas de Coca-Olmedo, con objeto de estudiar las variaciones cualitativas previsibles que experimentarían al ser mezcladas con las aguas de recarga artificial y planificar unas alternativas de recarga apropiadas desde el punto de vista medioambiental.

La estructura de este bloque, en consonancia con los restantes, consta de un encuadre en el que, tras definir los objetivos se repasa brevemente el “estado del arte.” Posteriormente se describen los “materiales y métodos.” Algunas técnicas específicas de mayor complejidad se describen en el desarrollo del apartado correspondiente.

Más tarde se lleva a cabo la caracterización de las aguas del acuífero en los estados pre, sin y postoperacional, presentando los resultados obtenidos, seguido de su discusión y estudio de las pautas de reacción consecuentes de los procesos de interacción agua-suelo.

Finalmente se presentan ciertas conclusiones que pueden servir de normas aplicables en la práctica, generalmente en el diseño y aplicación de técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT). También al diseño de dispositivos y técnicas apropiadas para el desarrollo efectivo de operaciones de recarga artificial (AR), tanto en la zona de estudio como en otros escenarios análogos. Esta tarea es postergada para el Bloque 5.

1.2. MARCO TEÓRICO

Para el adecuado entendimiento del Bloque es preciso controlar una serie de nociones teóricas a modo de “*estado de la cuestión*”. Gran parte de las definiciones precisas han sido definidas en el Apéndice 2 (Glosario).

Algunas de las nociones principales para entender los procesos de interacción Agua-Suelo son los parámetros hidroquímicos, cálculos de especiación-solubilidad, pautas de reacción y recarga cualitativa (Pyne, 2002).

Entre los primeros cabe destacar el potencial REDOX, Eh u ORP, el pH, conductividad, relación solubilidad-tamaño de grano, presencia de oxígeno y anhídrido carbónico en disolución, total de Sólidos Disueltos (TSD).

Los cálculos de Especiación-Solubilidad determinan el grado de saturación del agua en fases minerales y gases del sistema a partir de datos de análisis del agua y del empleo de un modelo termodinámico, deduciendo si una fase mineral determinada tenderá a la disolución o precipitación en un ambiente dado.

Los cálculos de pautas de reacción de las aguas subterráneas con el medio ambiente pueden ser originados por interacción química, física o cinética. Las técnicas más empleadas para el estudio de las pautas de reacción se basan en la modelización hidrogeoquímica, bien sea directa o inversa, que se introducen en el Aptdo. 4***.

La “recarga cualitativa” en casos como éste consistiría en prever cómo van a evolucionar las aguas después de la recarga artificial con aguas procedentes de un cauce fluvial sobre un acuífero en el que han sido detectados problemas de contaminación.

2. HILO CONDUCTOR

De acuerdo con el esquema operativo empleado, en este apartado se lleva a cabo una exposición de las distintas etapas que componen este bloque, en aras de presentar un hilo argumental que facilite su seguimiento.

Tras introducir el bloque y presentar unas nociones básicas sobre el estado de la cuestión, se describen los materiales y métodos empleados en campo y gabinete, para más tarde presentar de manera disociada los componentes del proceso de interacción.

La fracción líquida es caracterizada desglosadamente en cinco grupos de muestras, los “polos fríos” o aguas procedentes del exterior del sistema que representan el “punto de partida”, como es el agua de lluvia o de arroyos entrantes a la *Cubeta*, los

tres grupos siguientes corresponden a la caracterización hidroquímica en los puntos de la red de control en las etapas pre, sin y postoperacional. El último grupo corresponde al *Complejo de humedales* cuya recuperación se cuestiona en esta tesis doctoral.

La fracción sólida es caracterizada aplicando diversas metodologías, sobre todo análisis geoquímicos y granulométricos.

Los procesos de interacción entre ambas fracciones se llevan a cabo mediante cálculos de especiación-solubilidad, pautas de reacción, determinación de ambientes hidroquímicos en el espacio tras las operaciones de recarga artificial (AR). Sobre esta base se realizan previsiones sobre la evolución previsible de las aguas subterráneas como consecuencia de las operaciones de AR.

Finalmente se extraen aportaciones al conocimiento del medio hidrogeológico surgidas al aplicar criterios hidroquímicos, terminando con las conclusiones del bloque.

El “*hilo conductor*” aparece sintetizado en la Fig. 3.01, con mención de los principales apartados (Fig. 3.01).

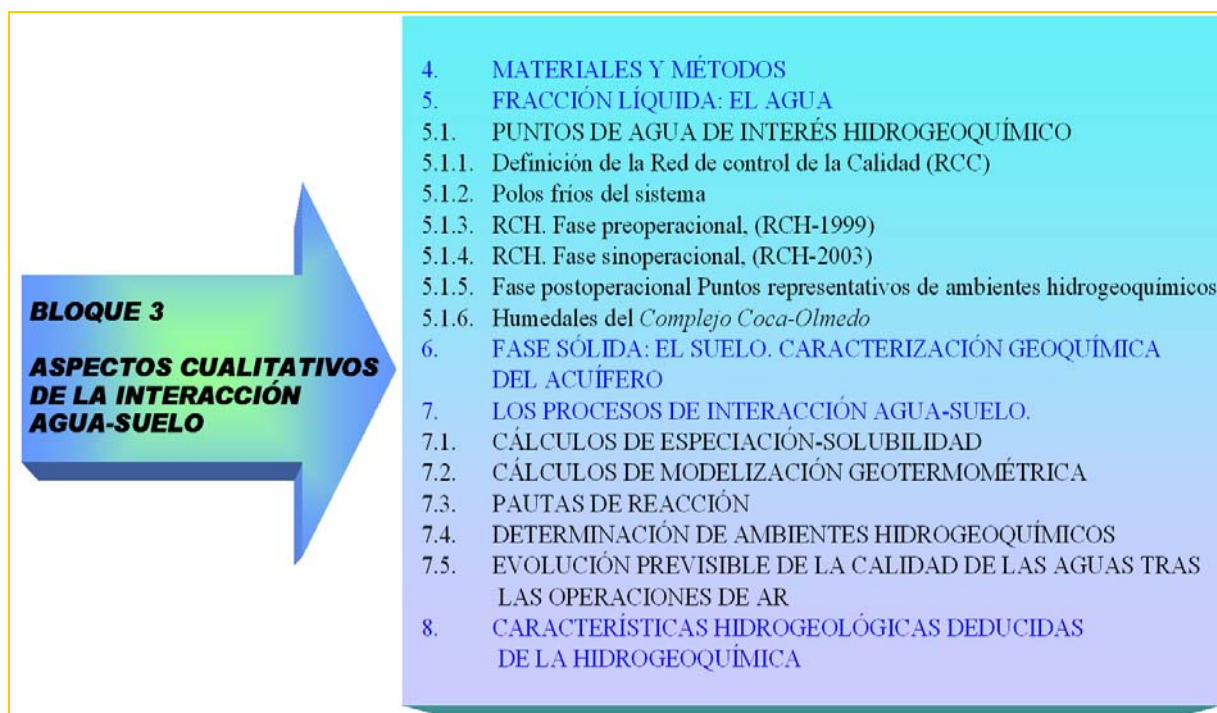


Fig. 3.01. Esquema argumental del Bloque 3: “Aspectos cualitativos de la interacción agua-suelo.”

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

El equipo empleado para determinaciones químicas y control de parámetros inestables en aguas y suelos ha variado entre la fase preoperacional y las siguientes. El instrumental utilizado para las determinaciones en la Red de Control de la hidroquímica (RCH) en 1999 (fase preoperacional) fue:

- Determinación en campo del O₂ disuelto. Fue empleado un Kit colorimétrico Merck 11.107.
- Determinación en campo del pH. La medición del pH se ha realizado con un pHmetro portátil HI 8.424. El aparato proporciona las medidas del potencial en mV y además en unidades de pH, puesto que incorpora una sonda ATC para compensación de la temperatura. La calibración del microprocesador se realizó con las soluciones tampón estándar por lo menos con una frecuencia semanal.
- Determinación en campo de la conductividad. La conductividad fue medida con un Conductivímetro portátil CRISON CDTM-523. Se trata de un instrumento digital de precisión dotado de una célula que determina la conductancia y la aplica un factor de corrección, que depende de las características de dicha célula, para obtener la conductividad. La resolución del aparato se extiende desde los 0,1 µS a 20 mS.
- Determinación de la temperatura del aire *in situ*. Medida mediante un termómetro atmosférico de 0,1°C de precisión.
- Determinación en campo del SH₂ disuelto. Fue utilizado un kit colorimétrico del tipo Merck 1.14.777.

En las restantes fases se ha empleado el siguiente equipo para la determinación de los parámetros citados:

- Determinaciones en campo de la temperatura del agua. Sonda de temperatura del pHmetro Hanna Instruments HI 9.025 C.
- Termómetro de suelos por penetración HI.
- Determinación en campo del O₂ disuelto. Oxímetro Hanna Instruments 9.143 con compensación de altitud, presión y salinidad.
- Determinación en campo del pH mediante pHmetro Hanna Instruments HI 9.025 C.
- Determinación en campo de la conductividad. Conductivímetro y medidor de TSD Hanna Instruments 9.635.

- Determinación en campo del SH_2 y temperatura con instrumental similar al empleado en la primera campaña.
- Contenido en hierro total. Medidor específico de ión hierro Hanna Instruments HI 93721 para rangos por encima de 400 $\mu\text{g/l}$ y HI 93.746 para rangos inferiores.
- Contenido en nitratos. En una primera etapa fue empleado el electrodo ión selectivo para determinaciones de nitratos *in situ* marca Crison 15.222-3.000. Posteriormente un medidor específico de ión nitratos Hanna Instruments HI 93.728 para rangos inferiores a 30 mg/l .
- Contenido en ión sodio. Medidor de ión sodio HI 931.100 con electrodo HI F 300 B y termopar HI 7.662.

3.2. MÉTODOS

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se plantea el siguiente desarrollo argumental:

Toma de datos de campo y muestreo de la fracción sólida y líquida. Para ello han sido muestreadas las aguas de recarga, aguas nativas (fase fluida) y suelos (fase sólida).

Determinación analítica de sus características y tratamiento estadístico de los resultados con análisis estadístico multivariable, con objeto de realizar agrupamientos que permitan una caracterización, no solo de las muestras, si no también de sus ambientes genéticos. Esta metodología será complementada con métodos gráficos para que gane consistencia (*Güler et al, 2002*).

Caracterización general de las aguas antes y después de la recarga artificial, con objeto de avanzar en el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del sistema, en especial en los circuitos de las aguas de recarga artificial. Esto es posible a partir del tratamiento e integración de los datos analíticos y su tratamiento mediante diversas técnicas y herramientas procedimentales, conjugadas siempre con las características estructurales y geomorfológicas de la Cubeta de Santiuste.

La información obtenida de la caracterización es potenciada mediante el empleo de herramientas auxiliares, tales como el análisis hidroestadístico, empleo de índices hidrogeoquímicos, clasificaciones de aguas, diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas y cartografías de isocontenidos e isorrelaciones.

Caracterización geoquímica del acuífero, episodio necesario para el estudio de los procesos de interacción.

Evolución hidroquímica de las soluciones resultantes de los procesos de interacción agua-suelo partiendo de los datos analíticos. Los procesos actúan en sistemas de elevada complejidad (multicomponentes y multifásicos), por lo que es preciso plantear técnicas de modelización geoquímica-termodinámica (*Langmuir,*

1997), como son la aplicación de modelos de especiación-solubilidad y de modelización directa e inversa para el cálculo de las pautas de reacción principales.

La técnica de aplicación de **modelos de especiación-solubilidad** adoptada para determinar la distribución de especies mineralógicas en las aguas en condiciones de equilibrio mutuo tras las operaciones de recarga artificial. También permite comprobar el estado de equilibrio/desequilibrio termodinámico de las reacciones involucradas en los procesos de interacción agua/roca, o mejor, agua-suelo.

El conocimiento de los procesos de interacción agua-suelo o **pautas de reacción** se ha llevado a cabo mediante códigos de modelización hidrogeoquímica. El empleo de perfiles hidroquímicos y técnicas adicionales ha permitido la determinación de **ambientes hidrogeoquímicos** resultantes de la interacción aguas nativas-aguas de recarga-acuífero.

A continuación se presentan las distintas metodologías procedimentales empleadas en las distintas fases del bloque, con tendencia al enfoque metodológico integral, si bien la sistemática específica a aplicar diferirá a escala de detalle, así como los materiales empleados en cada etapa.

3.2.1. Protocolo de muestreo

El protocolo seguido en campo en ambas campañas constó de las fases siguientes:

1) Medición del nivel del agua en la captación mediante hidronivel.

2) Muestreo de la captación. Con objeto de obtener una muestra de agua representativa fue “purgado” el punto de agua empleando su propio equipamiento, extrayendo un volumen de agua y esperando hasta su posterior reposición por recarga natural. La realización del muestreo durante la época estival posibilitó que casi todas las muestras fueran extraídas por bombeo, llenando los recipientes tras ser enjuagados y agitados tres veces con agua de la propia captación. En caso de ser inviable la extracción de agua mediante bombeo, se utilizó un hidrocaptor de cierre emisario lavado con agua de la propia captación.

3) Almacenamiento de la alícuota. Una vez extraída la muestra, se procedió al llenado de dos o tres recipientes. El primero era un vaso de precipitados en el que se han determinado los parámetros físico-químicos *in situ*. El segundo recipiente fue una botella de polietileno de 1 litro de capacidad con tapón roscado específica para su análisis en laboratorio. El llenado se efectuó hasta conseguir un menisco convexo por encima del extremo superior del recipiente. Inmediatamente después, la muestra fue etiquetada con tinta indeleble, introducida en nevera isotérmica y enviada a laboratorio homologado. El tercer recipiente es otra botella de polietileno empleada como muestra de seguridad, como medida preventiva ante la posibilidad de la pérdida o extravío de las muestras o de los resultados. Dichas muestras fueron conservadas en nevera hasta la obtención de los resultados de la analítica.

3.2.2. Determinaciones analíticas

Los protocolos seguidos en la determinación de los distintos parámetros, tanto en campo como en laboratorio, fueron los siguientes:

3.2.2.1. Determinación de parámetros inestables *in situ*

La medición “*in situ*” de una serie de parámetros inestables se ha realizado como consecuencia de que existen algunos macro y microconstituyentes cuyo valor suele presentar variaciones entre el momento de la toma de la muestra y el de recepción y análisis en el laboratorio. De todos estos parámetros, dados los objetivos del estudio, se han seleccionado:

- Temperatura de agua y ambiental en el momento de la toma.
- O₂ disuelto.
- SH₂ disuelto *in situ*.
- pH.
- Conductividad.
- Contenido en hierro total.
- Contenido en nitratos.

La metodología para determinar parámetros inestables en campo ha sido:

1) Determinaciones en campo de la temperatura del agua. Se realizó en todas las captaciones y humedales, introduciendo un termómetro de líquidos en el vaso de precipitados o en la masa de agua, con objeto de obtener la máxima aproximación de la temperatura real en el acuífero.

2) Determinación en campo del O₂ disuelto. Para la Determinación del O₂ disuelto se ha seguido el protocolo establecido en el kit colorimétrico y en el oxímetro Hanna Instruments 9143 debidamente calibrado.

3) Determinación en campo del pH. La medición se ha realizado directamente en un “vaso de precipitados”, ya que los aparatos empleados incorporan una sonda ATC para compensación de la temperatura. Al término de cada medida fue limpiado el electrodo con agua destilada, sacudido y almacenado en su caperuza de protección. Al término de cada jornada se añadía su solución de almacenamiento.

4) Determinación en campo de la conductividad. La medición se ha realizado directamente en “vaso de precipitados con un aparato calibrado con disolución de KCl 0,01 M previamente termostatada. Una vez extraída la muestra y vertida en un “vaso de precipitados” previamente lavado con agua destilada, se procedía a la conexión del microprocesador y de la célula sin sumergirla, comprobando que la medición es de 0,00 previamente a la medida y lectura. Anotada la medida, se extraía la célula, lavaba con agua destilada, sacudía y secaba con un trapo limpio y seco.

5) Determinación de la temperatura del aire *in situ*. Este parámetro ha sido determinado con un termómetro atmosférico de 0,1°C de precisión colgado a la sombra en las

inmediaciones del punto de agua al comienzo del muestreo de la captación. La medida era tomada al finalizar la recopilación de los restantes parámetros.

6) Determinación en campo del SH_2 disuelto. Para la determinación se ha seguido el protocolo establecido para un kit colorimétrico, teniendo en cuenta que, como consecuencia de la alta difusibilidad del SH_2 , las determinaciones se deben realizar inmediatamente después de la extracción de la alícuota.

7) Contenido en hierro total. Para la determinación se ha seguido el protocolo establecido para medidores de ión selectivo con lectura automática temporizada tras su viraje con un reactivo específico.

8) Contenido en nitratos. Igual que en el caso anterior.

En las Figs. 3.02) a 3.04) se muestran algunos aspectos de la toma de datos de campo, equipo empleado y ejemplo de aplicación del protocolo establecido.

3.2.2.2. *Análisis en laboratorio*

Realizado el muestreo y en un plazo no superior a 48 horas, se enviaron al laboratorio homologado, procediendo (salvo casos específicos) a las siguientes determinaciones:

- Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ y sílice.
- Aniones: Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- , HCO_3^- y CO_3^{--} .
- pH.
- Conductividad.

Las muestras se conservaron a una temperatura inferior a 8°C hasta su procesamiento y análisis, realizándose esto de acuerdo al PG/LT/08, según los plazos y protocolos establecidos normativamente (*Apha, 1998* y *AENOR, 1997*).

La metodología empleada para la determinación de los parámetros se expone en las Tablas 3.01 y 3.02, donde consta el pretratamiento de las muestras, el procedimiento estandarizado y técnica de determinación y el grado de incertidumbre asociado para cationes y aniones.

Parámetro	Unidad	Pretratamiento	Procedimiento	Técnica empleada	Incertidumbre
Nitratos	mgNO_3/l	Filtración. Adición de Hidróxido de Aluminio	PNTE/LTE/21 Rev.3	Espectroscopia UV-VIS	$\pm 12 \%$
Sulfatos	mgSO_4/l	Filtración	PNTE/LTE/36 Rev.3	Espectroscopia UV-VIS	$\pm 14 \%$
Sílice	mgSiO_2/l	Filtración. Digestión	PNTE/LTE/42 Rev.3	Espectroscopia UV-VIS	$\pm 16 \%$
Calcio disuelto	mgCa/l	Filtración	PNTE/LTE/49 Rev.4	ICP	$\pm 9 \%$
Potasio disuelto	mgK/l	Filtración	PNTE/LTE/49 Rev.4	ICP	$\pm 12 \%$

Magnesio disuelto	MgMg/l	Filtración	PNTE/LTE/49 Rev.4	ICP	± 10 %
Sodio disuelto	mgNa/l	Filtración	PNTE/LTE/49 Rev.4	ICP	± 14 %
pH	Ud.		PNTE/LTG/06 Rev.1	Electrometría	± 0.1 ud
Conductividad	µS/cm		PNTE/LTG/08 Rev.4	Electrometría	± 3 %

Cloruros	mg/l		PNTE/LTG/11 Rev.4	Argentometría	± 2 %
Carbonatos	mgCO ₃ /l		PNTE/LTG/30 Rev.1	Valoración	± 5 %
Bicarbonatos	mgHCO ₃ /l		PNTE/LTG/41 Rev.2	Valoración	± 7 %

Tablas 3.01) y 3.02). Metodología empleada para la determinación de los parámetros químicos en laboratorio (cationes, parámetros y aniones)



Fig. 3.02) y 3.03). Equipo empleado en la determinación de parámetros inestables in situ. El capot o el tejado del vehículo sirvieron de “laboratorio móvil”.



Fig. 3.04). Equipo empleado en la determinación de parámetros inestables in situ.

3.2.3. Caracterización hidroquímica de las aguas

De acuerdo con experiencias previas, se ha considerado que una caracterización queda suficientemente definida cuando se especifica una serie de factores que permiten contar con una información suficiente del acuífero y aguas subterráneas, de manera que cualquier cambio pueda ser relativizado con respecto a la situación inicial.

Para este objetivo es preciso recopilar una abultada serie de datos parámetros y su tratamiento, obteniendo ciertos parámetros artificiales, en su mayor parte calculados.

Los parámetros precisos para adquirir un grado de conocimiento suficiente del sistema y otros elementos adicionales conllevan, al menos, la identificación espacial y temporal de la muestra, su composición molar y molal, su balance iónico, carácter de la muestra con respecto a patrones estandarizados y concentración de minerales disueltos. Con respecto a su uso, es indispensable conocer su potabilidad e idoneidad para el regadío y uso industrial sobre la base de parámetros artificiales de clasificación.

El empleo de todos ellos permitirá detectar cualquier evolución en las características del sistema. Para ello es preciso además contar con herramientas adicionales, como son los índices hidrogeoquímicos, hidrogramas y cartografías temáticas.

El quimismo de las aguas requiere conocer otros aspectos indirectos pero imprescindibles para su estudio, como es la geología del entorno, la abundancia de captaciones, la naturaleza de los suelos por los que discurren las aguas subterráneas y superficiales, etc.

La caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua se ha realizado con el apoyo de dos aplicaciones informáticas específicas de hidroquímica: Hydrochem V. (Rockware) y Aquachem 3.70. (Waterloo software, 1999). El primero de ellos genera salidas gráficas de diagramas hidroquímicos de calidad. El segundo es un paquete de programas de hidrogeoquímica que ayuda a caracterizar evolutivamente las muestras de un área en el espacio y en el tiempo. Entre sus aplicaciones cuenta con herramientas de generación de bases de datos de análisis y parámetros geoquímicos, cálculos (desde simples balances iónicos a evaluaciones estadísticas complejas), cálculos geotermométricos y fases minerales estables para muestras simples o grupos de muestras, lo que permite interpretar y comparar los datos geoquímicos de distintas aguas.

De forma adicional y para caracterizaciones específicas se ha aplicado el módulo de modelización geoquímica WATEQ4F (Ball & Nordstrom, 1991), para el cálculo de las especies químicas en disolución o saturación.

Los grupos de parámetros considerados indispensables para una caracterización hidroquímica adecuada han sido:

- Identificación de la muestra y de las características del lugar del muestreo.
- Datos físicos e hidrogeológicos relativos al punto de agua y parámetros del agua.
- Cationes (Ca, Mg, Na, K, etc.).



- Aniones (Cl, Br, SO₄, NO₃, etc.).
- Parámetros inestables y elementos traza.

El criterio básico para llevar a cabo las distintas caracterizaciones ha sido la disponibilidad de datos de analítica de las aguas subterráneas del acuífero en cada etapa. Las fases pre y operacional cuentan con una cantidad de datos abultada, gracias a los trabajos realizados por el MAPA entre 1999 y 2003. En cambio la etapa postoperacional y los restantes grupos de aguas cuentan con datos insuficientes en muchos casos, aunque suficientes para estudiar la evolución de los iones más importantes para el fin pretendido, que no es otro que estudiar la evolución de las aguas del acuífero y de los humedales que hay en el sistema con las labores de recarga artificial y las posibilidades de influir en su composición final.

Se ha considerado procedente también emplear algunas técnicas y herramientas opcionales, tales como:

- Localizar muestras o grupos de características análogas de acuerdo con algún criterio de búsqueda, y agruparlas en subgrupos (agrupamientos en “*familias*” de facies).
- Determinar a partir del análisis de los datos la las facies hidroquímicas, sólidos disueltos, balance iónico para la comprobación de la calidad de los análisis de laboratorio, dureza (expresada en distintos grados y sistemas), alcalinidad, etc.
- Calcular las relaciones iónicas más comunes, minerales disueltos, cálculos estadísticos (tales como valores promediados de un grupo de aguas), cálculo de la matriz de correlación, regresión lineal entre grupos de muestras según un parámetro determinado resultante de la mezcla de aguas distintas, etc.

Esta metodología, diseñada para conseguir una apropiada caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas del sistema, se ha aplicado en tres periodos consecutivos: La fase *preoperacional* (correspondiente a la situación del acuífero en verano de 1999), *operacional* (febrero de 2003), y *postoperacional* (agosto de 2003), al término del primer ciclo de recarga artificial.

3.2.4. Análisis hidroestadístico

Se ha realizado un análisis hidroestadístico con los datos de la analítica, con objeto de definir el rango de variabilidad y su distribución espacial, así como detectar anomalías y singularidades cualitativas.

Para ello se han aplicado técnicas de análisis estadístico multivariable, que permiten combinar parámetros físicos y químicos para clasificar las muestras de aguas, realizar agrupamientos por sus similitudes físico-químicas y discriminar las muestras con valores extremos, procedimiento conocido como análisis de grupos jerárquicos o **HCA** (*hierarchical cluster análisis*) (Güler et al, 2002).

Dado que las técnicas estadísticas no ofrecen una fácil accesibilidad a los resultados químicos de los grupos de muestras, su caracterización va acompañada de métodos gráficos, como son los diagramas de Piper-Hill-Langelier, lo que ofrece una

metodología robusta y consistente para clasificar grupos de muestras basándose en parámetros físicos y químicos comunes (Güler *et al*, 2002).

El tratamiento de datos analíticos de las aguas pretende alcanzar ciertos aspectos clave para todo estudio hidroquímico, entre los que cabe destacar la selección de muestras de acuerdo con su representatividad, el estudio de la precisión de los análisis químicos, las agrupaciones en familias de muestras de sistema genético similar y el estudio de las relaciones inter elementales (Isaaks & Srivastava, 1989).

La descripción estadística de los constituyente y parámetros inestables se ha realizado con hoja de cálculo tipo *Microsoft Excel*, obteniendo los valores máximos, mínimos, la media y la varianza en cada una de las distribuciones. Posteriormente se ha realizado el estudio de la disposición de cada variable respecto a la totalidad de muestras analizadas mediante diagramas de series y matrices de correlación. Además se ha realizado un estudio de las relaciones y dependencias con los parámetros inestables, en especial pH, conductividad y T.^a mediante su representación en hidrogramas binarios.

Una técnica hidroestadística aplicable al análisis de poblaciones es el “análisis de correlación y regresión.” A partir de las matrices de correlación para la relación de variables (bien sean positivas o negativas) y de los coeficientes de correlación, es posible estudiar el grado de interdependencia entre las mismas (Kershaw, 1973). El cálculo de las matrices puede ser realizado de forma automática (*Waterloo software*, 1999). En el caso que nos ocupa, la elaboración de matrices con datos de distintos períodos de captaciones situadas en las inmediaciones del caz permite obtener conclusiones acerca de la incidencia de la AR en el sistema y la dependencia existente entre la variación cualitativa y las características primigenias.

3.2.4.1. Comprobación de la calidad de los análisis

La comprobación de la calidad analítica resulta una necesidad intrínseca a toda modelización. Se ha atendiendo a dos criterios:

- Cálculo del balance iónico:

El error del balance de aniones/cationes constituye un indicador de la calidad de los análisis químicos, estando el error permitido en función de la conductividad de las soluciones. La expresión utilizada para el cálculo del balance iónico o error de balance de cargas ha sido incorporado en los códigos de modelización de la familia PHREEQC (Parkhurst, 1990) y WATEQ4F (Ball & Nordstrom, 1991). Queda definido por la ecuación:

$$\% \text{ BALANCE} = \left(\frac{\sum (m_i \cdot Z_i)_{\text{cationes}} - \sum (m_i \cdot Z_i)_{\text{aniones}}}{[\sum (m_i \cdot Z_i)_{\text{cationes}} - \sum (m_i \cdot Z_i)_{\text{aniones}}] / 2} \right) \times 100$$

- Desviación entre conductividad medida y calculada (cálculo de residuales):

La conductividad eléctrica de una solución acuosa representa la concentración de iones disueltos en dicha solución. El control se establece calculando las residuales, o valor porcentual de la desviación entre la conductividad medida y la calculada, usando como criterio de validez porcentajes de desviación inferiores al $\pm 10\%$.

La aplicación de los dos criterios de evaluación considerados ha permitido la verificación y adecuación de los datos analíticos, determinados *in situ* y en laboratorio, para su posterior tratamiento y modelización geoquímica a partir de códigos informáticos.

El balance calculado para los distintos grupos de muestras no sobrepasa, en general, el 10 %, por tanto, se considera que los resultados analíticos son correctos.

3.2.5. Caracterización geoquímica del acuífero (suelos)

El estudio de la fracción “*suelo*” requiere un conocimiento exhaustivo del mismo que permita identificar los procesos hidroquímicos resultantes de la interacción y poder realizar previsiones evolutivas, tanto para su zona no saturada como saturada. Para ello es preciso conocer la composición de determinadas formaciones y el análisis de suelos y fases minerales estables en lagunas salinas o bodones y distintas zonas del acuífero (*Alcalá del Olmo, 1975; Rey Benayas, 1991*), y realizar una caracterización lo más precisa posible de las aguas subterráneas y del medio sólido por el que discurren y del que adquieren su quimismo.

Las distintas técnicas empleadas han sido presentadas en este orden:

- Muestreo de la fase sólida.
- Testificación detallada.
- Análisis geoquímicos de los suelos (fracción sólida).
- Análisis granulométricos y clastométricos: análisis morfooscópico y granulométrico de las poblaciones de clastos.
- Conocimiento de la mineralogía aplicando técnicas petrográficas. Determinación de las fases minerales y cuantificación mediante el conteo modal.
- Estudio de la capacidad de autodepuración del terreno

Se ha intentado sin éxito aplicar otras técnicas, como han sido el empleo del microscopio electrónico de barrido (SEM), la difracción de Rayos X (DRX), la relación Láser-Masas (LAM) y el ICP de masas.

3.2.6. Modelización Hidrogeoquímica

Los **cálculos de modelización** (englobados como cálculos de **pautas de reacción**) posibilitan determinar las condiciones termodinámicas para alcanzar el equilibrio tras los procesos de interacción agua nativa-agua de recarga-suelo. Conociendo las condiciones genéticas y aplicando distintas técnicas se prevé determinar, con un grado de incertidumbre bajo, el quimismo futuro de las manifestaciones acuosas.



La técnica para estudiar las pautas de evolución será básicamente la modelación directa, es decir, a partir de ciertos datos analíticos (polos extremos o fríos), otros termodinámicos (condiciones del acuífero) y de una serie de suposiciones hidroquímicas reactivas (base de datos seleccionada específica para procesos de interacción agua-suelos silíceos) se estima la composición de la solución final (agua del acuífero tras la recarga), la pauta de reacción (dependiendo del sector de la *Cubeta*, ya que cada uno tiene unas características específicas) y el balance de masas (prestando atención desde un principio a la cantidad de agua que se aplica al acuífero mediante recarga artificial y al caudal infiltrado).

En la zona de descarga (manantiales y rezumes en las terrazas del río Voltoya y extremo norte de la *Cubeta*), se puede proceder al muestreo del agua de descarga evolucionada, lo que permitiría aplicar técnicas de modelación inversa. Esta metodología, aunque no ha sido realizada en el desarrollo de esta tesis doctoral, dado que las aguas raramente pueden haber alcanzado tal posición tras un ciclo de recarga, puede ser llevada a cabo en futuros ciclos. Esta labor requiere que el sistema tenga un comportamiento “típicamente controlado”.

Puesto que la disponibilidad de datos es un factor limitante, se debe prestar una gran atención en determinaciones químicas de las “condiciones de referencia”, tanto para parámetros estables como inestables, pues cabe esperar una rápida evolución de las aguas subterráneas por la interacción con procesos contaminantes ya presentes, y por sus tendencias evolutivas. De este modo es posible determinar que reacciones químicas restringidas se ajustan mejor a las condiciones y a los datos disponibles relativos a las reacciones químicas ajustadas y a la modelización del balance de masas. Para ello es preciso considerar la estequiometría que aporta cada fase a los elementos a ajustar (relación molar).

Las técnicas más empleadas para el estudio de las pautas de reacción se basan en la modelización hidrogeoquímica, bien sea directa o inversa, que se describen brevemente a continuación.

– **Modelación directa**

A partir de ciertos datos analíticos y termodinámicos y una serie de suposiciones hidroquímicas reactivas, se estima la composición de la solución final, la pauta de reacción y el balance de masas (transferencia).

El esquema operativo es:

SOLUCIÓN INICIAL + REACTIVOS+ ? (CONDICIONES ESTABLECIDAS)=
=SOLUCIÓN FINAL + PRODUCTOS

– **Modelación inversa**

Conocida la composición de determinadas aguas, se determina las reacciones que han ocurrido previamente, los posibles procesos de interacción agua-roca y las condiciones termodinámicas previas que han condicionado su génesis.



El esquema operativo es:

SOLUCIÓN FINAL>>AGUA INICIAL-REACCIONES CON FASES MINERALES- CONDICIONES TERMODINÁMICAS

El **tratamiento cualitativo** debería empezar por la selección del código de modelización hidrogeoquímica más idóneo para los fines propuestos, para más tarde, realizar previsiones de la evolución de las aguas de recarga tras interaccionar con el acuífero.

La metodología propuesta queda recogida en el esquema operacional de la Fig. 3.05, que recopila todos los pasos intermedios para conocer las pautas de reacción previsibles en el sistema, conocer las reacciones hidroquímicas elementales, las ecuaciones de gobierno y la caracterización de ambientes hidrogeoquímicos.

En primer lugar, es preciso contar con una caracterización detallada del ámbito de actuación, desde el punto de vista geológico, geomorfológico e hidrogeológico.

Posteriormente, deben ser conocidas las aguas subterráneas del sistema mediante una caracterización detallada, acompañada de técnicas de tratamiento de datos como pueden ser los diagramas hidroquímicos, reacciones interelementales y tratamiento estadístico de los datos de las analíticas.

Resulta preciso realizar cálculos de la fuerza iónica de los constituyentes presentes en la base acuosa, factor que condiciona los procesos de interacción. Esta tarea ha sido realizada mediante la aplicación de los códigos de modelización WATEQ y PHREEQC, expresando los resultados en forma de balance iónico y de la concentración de minerales en sobresaturación y subsaturación para cada muestra.

El otro miembro de los procesos de interacción, el suelo o la roca, debe ser estudiado mediante la especiación mineralógica de las distintas fases, conociendo su mineralogía y composición química, como labor previa a los cálculos de especiación-solubilidad.

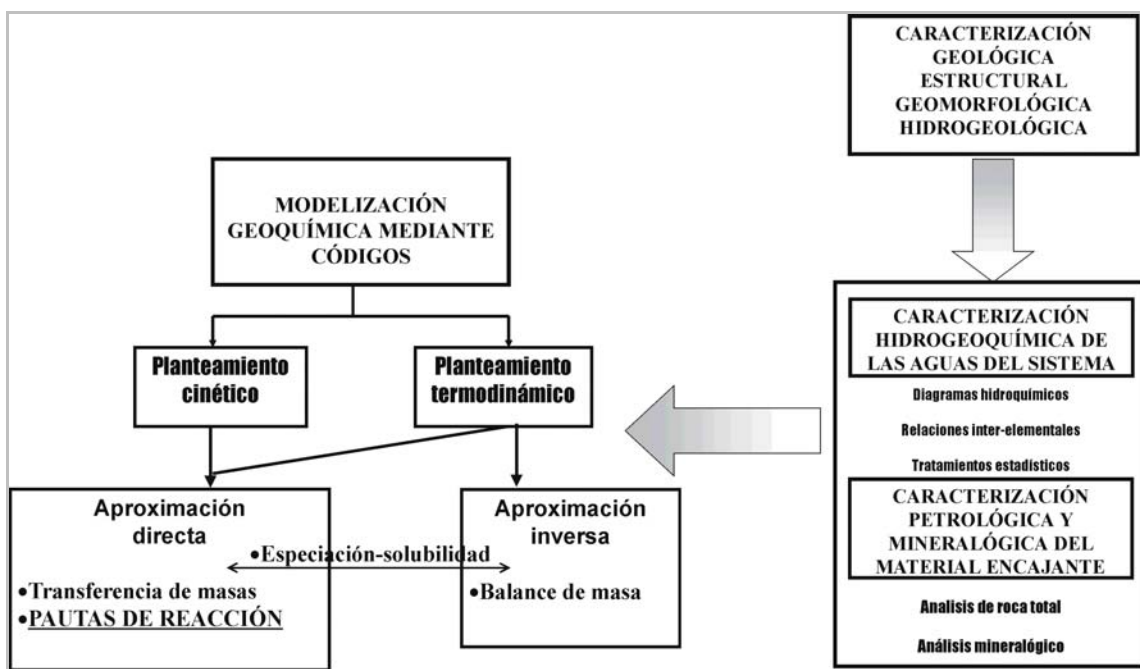


Fig. 3.05. Esquema operacional de las distintas etapas que permiten conocer las pautas de reacción previsibles como consecuencia de procesos de interacción entre aguas de distintas composiciones y suelos/rocas en unas condiciones determinadas (tomado de Buil y Fdez. Escalante, 2001).

El análisis de los minerales del “encajante” debe ser estudiado por etapas:

- 1) Análisis con lupa binocular y microscopio de luz polarizada en láminas delgadas, con objeto de detectar texturas y estructuras (minerales en disolución, fases en precipitación, texturas heredadas, etc.).
- 2) La abundancia de margas y sales en algunos sectores del sistema ha impedido aplicar esta técnica, dada la dificultad de elaborar láminas delgadas y de la elevada proporción de carbonatos.
- 3) Determinación analítica cuantitativa de las fases minerales del encajante mediante el empleo de la microsonda electrónica o formulación teórica de fases estables.
- 4) Conocida la composición química de cada fase, se suele realizar una simplificación previa a su integración a los códigos, que consiste en emplear términos puros de menor energía libre para conseguir alcanzar la constante de equilibrio. No obstante, el planteamiento del modelo Netpath en términos puros suele presentar problemas de convergencia con los filosilicatos (Buil, 2001).

La metodología propuesta se simplifica del siguiente modo:

- 1) Aplicación de un modelo de especiación-solubilidad en las condiciones termodinámicas existentes con objeto de acotar las pautas de reacción más probables.
- 2) Determinación de las fases minerales en base a su grado de saturación en las aguas y su detección en los suelos.

- 3) Elección de un código para su empleo en modelación directa, es decir, para la determinación de los productos de reacción, la velocidad de generación de tales productos y las pautas de reacción seguidas.

Los códigos de modelización hidrogeoquímica más aplicables por su facilidad de acceso e idoneidad de las bases de datos asociadas (consecuencia de su alta polivalencia) serían principalmente el EQ3/6, el PHREEQC, el WATEQ4F y el NETPATH (*Buil, 2001*). Los datos analíticos imprescindibles para ejecutar un código de modelización son: pH, T^a, Eh y las concentraciones analíticas de aniones (incluyendo la alcalinidad) y cationes (mayores, menores y trazas). Obviamente, cuanto mayor es la cantidad de datos, mejores son los resultados.

3.2.7. Determinación de ambientes hidrogeoquímicos

Los ambientes han sido determinados a tenor de los datos de campo, las reacciones químicas deducidas aplicando distintos métodos y la evolución de la concentración de determinados iones, tales como nitratos, sulfatos y arsénico con la profundidad de las aguas subterráneas bajo el nivel freático, de acuerdo con los trabajos de *Van Beck et al (1989)* y *Böhlke (2002)*, y su constatación en campo en las captaciones con muestreo a más de una profundidad.

También se han tenido en consideración los trabajos de *Massmann et al (2002)* relativos a la evolución de determinados iones con respecto a la distancia al río en el *Oderbruch* situado 50 km al noreste de Berlín, Alemania (*Massmann et al, 2002*).

Un estudio parecido ya presentado en el análisis de los antecedentes para el High Plain de Texas se encuentra en *Fryar, 2001*.

En definitiva, este planteamiento metodológico permite conocer eficazmente la hidrogeoquímica del acuífero, prever su comportamiento ante la recarga artificial, realizar previsiones sobre este comportamiento a largo plazo y adoptar metodologías de tratamiento del acuífero y de las aguas de recarga. Un tratamiento integral apropiado de todo el conjunto permitirá minimizar los impactos ambientales que operan sobre las calidad de las aguas de recarga artificial y sobre el medio receptor, y preservar las instalaciones para que mantengan el mayor “*óptimo de recarga*” posible, dentro del marco del desarrollo sostenible y de los objetivos de calidad preestablecidos.

Dada la alta especificidad del estudio, se considera improcedente describir todas y cada una de las metodologías empleadas en todas las secciones que constituyen el bloque, por lo que, en casos puntuales, se ha postergado la descripción metodológica empleada para cada apartado específico.

4. ESTADO DEL ARTE

La información obtenida de la caracterización es potenciada mediante el empleo de herramientas auxiliares, tales como el análisis hidroestadístico, empleo de índices hidrogeoquímicos, clasificaciones de aguas, diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas y cartografías de isocontenidos e isorrelaciones.

- **Índices hidrogeoquímicos**

Las relaciones entre los iones disueltos en un agua se pueden utilizar para deducir la evolución de la composición química del agua subterránea, la actuación de fenómenos modificadores concretos, el origen de alguna característica especial de dicho agua, detectar mezclas de aguas, estudiar como es la circulación regional y determinar el tiempo de residencia del agua en el acuífero, el grado de salinización alcanzado, etc. (Custodio y Llamas, 1983).

El índice hidrogeoquímico seleccionado depende del fin pretendido. Existe una serie de índices “convencionales”, aunque queda al criterio del hidrogeólogo la selección de la relación iónica más idónea según lo que se proponga. A la hora de emplear índices hidrogeoquímicos el *modus operandi* suele ser doble:

- Por un lado se intenta estudiar la evolución “*en absoluto*”, es decir, la evolución espacial de los valores a partir de la ordenación de ciertas isorrelaciones iónicas, y si se considera procedente, la elaboración de mapas temáticos para las isorrelaciones más comunes.
- Por otro lado se emplea el método de estudio “*en relativo*”, es decir, estudiando la evolución de forma confrontada entre parejas de iones, o bien entre ciertos iones con respecto a la evolución de la conductividad de las muestras u otro parámetro relevante.

Ambos tipos de metodologías han sido aplicadas a lo largo del Bloque. Conviene aclarar que el empleo de estas herramientas debe efectuarse a partir de la elaboración de la cartografía geológica (la geología de superficie y profunda se utilizará como elemento de ayuda para la interpretación de los resultados a lo largo del estudio, como por ejemplo las facies hidroquímicas vinculadas a la litología aflorante o la constatación de fallas profundas) y la cartografía hidrogeológica (se estudiará la tendencia hacia una evolución de los índices químicos en concordancia con el/los sentido/s del flujo subterráneo).

Las relaciones más empleadas son:

- Relación magnesio/calcio
- Relación potasio/sodio
- Relación cloruro/bicarbonato.
- Relación sulfato/cloruro.
- Relación sodio/calcio.



- Relación sodio/cloruro.
- Relación sodio/(calcio+magnesio)
- Relación cuadrática sulfato/calcio: $\sqrt{rSO_4 / rCa}$
- Relación cuadrática del calcio/bicarbonato: $3\sqrt{rCa \cdot (rCO_3H)^2}$
- Índices iónicos:
 - Índice catiónico.

$$IC = \frac{Na + K}{Ca + Mg}$$

- Índice aniónico.

$$IA = \frac{Cl + SO_4}{HCO_3}$$

- Índice de cambio de bases. Es un índice de desequilibrio entre los iones cloro y los alcalinos:

$$icb = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}$$

Para valores negativos conviene emplear la relación:

$$icb(-) = \frac{rCl - r(Na + K)}{r(SO_4 + CO_3H^- + NO_3)}$$

Los fundamentos teóricos del método pueden ser consultados en la bibliografía específica (*Custodio y Llamas, 1983, MAPA, 1999^a, Böhlke, 2002 y Fdez. Escalante, 2001 y 2002b*).

• Clasificaciones químicas y parámetros artificiales

Cabe destacar los trabajos de *Stabler, 1911; Domenico & Schwartz, 1990; Drever, 1982; USEPA, 1992*, etc. Una recopilación de los más importantes se encuentra en *Fdez. Escalante, 2002b*.

• Hidrogramas

En cuanto a la representación gráfica de un análisis de agua, existen multitud de métodos gráficos que representan una forma alternativa al trabajo de manejar tablas que expresan los datos numéricos de una serie de análisis de agua. Estas representaciones suelen ser designadas con el nombre del autor.

Se trata de una forma de expresión más didáctica, sintética, rápida y espectacular que una expresión numérica. Su interpretación, si se ha escogido un método gráfico adecuado, nos permite comparar muestras de diversos tipos de aguas, destacar sus analogías y diferencias (entre muestras individuales y familias de muestras), la

evolución geoquímica de las aguas en el espacio y tiempo, tendencias de evolución en el espacio, su relación con las litofacies drenadas, representar diversos parámetros y propiedades, confrontar relaciones iónicas, clasificar muestras en grupos de características similares, elegir muestras representativas, detectar anomalías o singularidades, etc. Por lo que resulta importante seleccionar el método de representación en función de los objetivos propuestos.

Cabe destacar los trabajos de ciertos autores como *Stabler, 1911; Collins, 1929; Piper, 1944; Langelier, 1944; Durov, 1948; Maucha, 1949; Stiff, 1951; Schoeller, 1962; Gomis, 1967; Lloyd & Heathcote, 1985* [para el empleo de diagramas hidrogeoquímicos de *Scatter* (=de dispersión)]; [*Riverside* (=FAO, 1987)], *Domenico & Schwartz, 1990; SAR-conductividad* (=USEPA, 1992); *Pyne, 1995; Chada, 1999; Queralt, 2000, etc.* Una recopilación de los más importantes se encuentra en *Fdez. Escalante, 2002b*.

- **Cartografías de isocontenidos**

Constituyen una herramienta apropiada para estudios hidrogeoquímicos en una zona determinada. La variación espacial de los iones que componen las muestras analizadas en una zona en la que se pretende averiguar ciertas características hidrogeológicas a partir de datos del quimismo de sus aguas resulta fácilmente accesible a partir de la observación de los mapas de isolíneas (líneas que unen puntos de igual concentración de dicha sustancia) o isocoras. Resulta además interesante y especialmente apropiado para aquellos casos en los que se estudia la relación agua-acuífero representar los principales rasgos geográficos y geológicos del área. (*Fdez. Escalante, 1999 y 2001*).

- **Cartografías de isorrelaciones iónicas**

Se trata de un tipo de cartografías específicas para estudios tanto en absoluto como en relativo que permiten estudiar la variabilidad especial de ciertos procesos en un sistema. Algunas relaciones permiten un ordenamiento de las muestras analizadas de acuerdo con su tiempo de residencia en el acuífero, aumento de la salinidad, progreso de los procesos de desnitrificación, etc. Esta facultad dota a esta técnica de capacidad e idoneidad para su empleo en operaciones de recarga artificial y estudio de la evolución de las aguas durante la recarga y con posterioridad a la misma.

El **estudio de la intersección de las isocoras** constituye una importante y novedosa línea de investigación que apenas figura en los antecedentes consultados. Algunos de los trabajos en los que se menciona el empleo de esta técnica son los de *Galán et al, 2001b*. A lo largo de este Bloque se desarrolla esta técnica.

Según la experiencia del autor adquirida a lo largo de la realización de este estudio y otros precedentes, cabe distinguir varios grupos de casuísticas, indicadores de determinados rasgos o pautas de comportamiento. Entre las casuísticas encontradas en el medio caben destacar las siguientes:

- Las isocoras de la mayor parte de los iones son perpendiculares a los cauces fluviales/caz de recarga. En este caso el agua del río no parece influir en la composición de las aguas subterráneas del acuífero, por lo que previsiblemente el comportamiento del río o dispositivo de recarga artificial será efluente o ganador en la zona.
- Las isocoras de los iones son oblicuas a los cauces fluviales/caz de recarga. En este caso puede haber procesos de mezclas de aguas, cierta relación entre el río y acuífero que puede ser variable a lo largo del tiempo, dependiendo del nivel de base, altura de la lámina de agua y del nivel freático. También puede haber una cierta alternancia de tramos ganadores y perdedores en el cauce fluvial.
- Las isocoras de los iones son paralelas a los cauces fluviales/caz de recarga. En este caso, el río parece ceder agua al acuífero, que presenta variaciones cualitativas a medida que se aleja de la formación aluvial como consecuencia de los procesos de interacción. Esta posición es la más representativa del idóneo funcionamiento de los dispositivos de recarga artificial.
- Las isocoras de las determinadas relaciones iónicas permiten deducir la presencia de determinados elementos en el medio que no afloran en superficie. Por ejemplo se ha detectado en algunos sectores que isolínea correspondiente a la relación iónica Cloruro/bicarbonato próxima a uno es determinante de la presencia de yacimientos salinos en el subsuelo, como ha ocurrido en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, donde se ha encontrado esta casuística en torno a lentejones salinos subterráneos detectados por procedimientos indirectos y testificados en sondeos.
- Algunas isorrelaciones corroboran la presencia de procesos contaminantes en las aguas subterráneas, como puede ser domos en las isolíneas de cloruros, sodio, nitratos, etc.

Vistas algunas de las “reglas del juego”, en los próximos apartados se van a elaborar cartografías de isocoras específicas con objeto de avanzar en el conocimiento del medio.

- **Modelización Hidrogeoquímica**

La adición de aguas de recarga al circuito de interacción implica variaciones en las condiciones imperantes en el medio, especialmente las relativas a variaciones en las condiciones termodinámicas.

Las variaciones en los rangos de temperatura y/o presión causan variaciones en las composiciones de equilibrio de ese sistema (*Plummer, 1984; Auqué, 1993*), imposibilitando el acercamiento a condiciones de equilibrio total en el sistema. No obstante, es posible la existencia de sistemas en equilibrio parcial en los que uno o varios minerales se aproximan a situaciones de equilibrio con las soluciones a pesar de las variaciones termodinámicas (*Auqué, 1993*).



En este contexto, se han seleccionado aquellos modelos termodinámicos basados en el supuesto de existir situaciones de equilibrio termodinámico (aunque sea parcial) en el sistema, como son los modelos de especiación-solubilidad y de pautas de reacción.

Las etapas consecutivas previas al planteamiento de cualquier modelización conllevan la elección del código(s) de modelización más idóneo, la introducción de datos analíticos fiables y precisos, y la elección de los datos termodinámicos en que se van a llevar a cabo las simulaciones.

La **elección del código** es función de diversos criterios, tales como la capacidad de resolver los cálculos requeridos (especiación-solubilidad, balance de masas, mezclas de soluciones, etc.), la efectividad (casi siempre vinculada a la de la base de datos termodinámica que traiga asociado dicho código), y las posibilidades de verificación y validación de cada código, hasta la fecha bastante reducidas al ser procesos que, en ocasiones, requieren grandes períodos de tiempo.

- **Códigos de modelización hidrogeoquímica**

El tratamiento cualitativo debería empezar por la selección del código de modelización hidrogeoquímica más idóneo para los fines propuestos, para más tarde, realizar previsiones de la evolución de las aguas de recarga tras interaccionar con el acuífero. Dicho código debe cumplir, al menos, los siguientes requerimientos:

- Fiabilidad en los cálculos de especiación-solubilidad, determinando con precisión el grado de saturación del agua en fases minerales y gases del sistema a partir de datos de análisis del agua y del empleo de un modelo termodinámico, deduciendo si una fase mineral determinada tenderá a la disolución o precipitación en un ambiente dado.
- Precisión en los cálculos de balance de masas, determinando que fases minerales y en que cantidad deben funcionar como reactivos, y la cantidad de productos que deben disolverse o precipitar entre dos puntos inicial y final de un sistema de composición química conocida. Estos puntos suelen ser los polos extremos o aguas inicial y final de una pauta de flujo.
- Idoneidad para calcular pautas de reacción en las condiciones termodinámicas del acuífero, es decir, que permita prever la composición química de una solución acuosa, y la cantidad de fases minerales que se disolverán o precipitarán en condiciones termodinámicas restringidas, suponiendo operativas ciertas reacciones teóricas obtenidas en la caracterización.

Las pautas de reacción están condicionadas por:

- La idoneidad y veracidad del modelo termodinámico, dependiente a su vez de la base de datos asociada.
- La certidumbre composicional o analítica del agua inicial (hipotética u observada).
- La cantidad de reacciones irreversibles y/o restricciones del equilibrio entre las fases minerales y el agua.



Su empleo permitirá verificar:

- La influencia de la termodinámica en modelos que teóricamente no lo son (balance de masas).
- Estimar composiciones y balances de masas en puntos intermedios de la pauta de reacción (zona no saturada o estadios intermedios entre la zona de recarga y de descarga entre los polos extremos).
- Prever la composición de los productos resultantes de determinadas reacciones hipotéticas.

Los códigos o programas con los que se han realizado tanteos previos a la selección del más adecuado para la elaboración de modelos de especiación-solubilidad han sido: WATEQ4F (*Ball y Nordstrom, 1991*), PHREEQC/ PHREEQE (*Parkhurst et al, 1990*); y de pautas de reacción: NETPATH (*Plummer et al, 1991*) y EQ3/6 (*Wolery, 1983*).

El ya clásico modelo **WATEQ** (WATER eQuilibrium) del USGS sirve para especiar los iones disueltos en el agua en unas condiciones termodinámicas de 25°C y una atmósfera. Este modelo ha sido el empleado para conocer las fases disueltas en las aguas subterráneas, especialmente en las zona de humedales salinos.

El **PHREEQC** (pH Redox Equilibrium Equation), desarrollado por el USGS (*Parkhurst et al, 1990*), incluye cálculos de especiación-solubilidad y pautas de reacción en condiciones de 1 atmósfera y entre 0 y 100°C.

El código **NETPATH** (*Plummer et al, 1991*) permite calcular las posibilidades de generación de una reacción química ajustada (RQA), establecer modelos de balance de masas, electrones e isótopos en el sistema y determinar que conjunto de reacciones químicas restringidas se ajusta mejor a las condiciones del sistema y a los datos disponibles. Para ello considera la estequiometría que cada fase aporta a los elementos a ajustar (relación molar) y que no puede haber fases minerales que sean combinación lineal de otras presentes. La no disponibilidad de datos geoquímicos derivados de la microsonda de electrones ha impedido el uso de este código.

Los modelos **EQ3NR/EQ6** fueron desarrollados en el *Lawrence Livermore National Laboratory de California*. El primero permite realizar cálculos de especiación, el segundo la cinética de las reacciones geoquímicas y sus pautas de reacción.

• Capacidad de autodepuración del terreno

El principal problema que presentan los acuíferos arenosos es su alta vulnerabilidad a la contaminación por vertidos de sustancias nocivas.

En los casos “controlados” el problema se reduce a la capacidad de las plantas de tratamiento para eliminar sólidos en suspensión y contaminantes orgánicos, sin importantes consideraciones sobre elementos traza. Esta “relajación” ante los elementos



traza se justifica porque el origen de las aguas no es industrial por lo general; las industrias existentes tienen escasa capacidad contaminante (nave de lavado de botellas, resinerías) y no generan microconstituyentes en abundancia. Las aguas de origen ganadero suelen presentar concentraciones importantes en trazas tipo cobre y cinc, que no han sido evaluadas.

Los casos “incontrolados” son escasos, y son más atribuibles al desconocimiento del efecto que producen los vertidos conocidos sobre el acuífero, que a la presencia de vertidos de forma irregular. Por tanto, en este apartado se pretende estudiar la alteración en la calidad hidroquímica del agua del acuífero derivada de la recarga con las aguas residuales de Santiuste de San Juan Bautista.

Para ello, y basándonos en la técnica de los escenarios análogos, se han estudiado las experiencias de ensayos similares en otros países. En concreto, se ha recurrido a las experiencias en el Reino Unido de utilización de los acuíferos como almacén de efluentes residuales (*Bouwer et. al. 1984; Hartman et. al. 1980; Idelovitch et. al. 1984; Baxter y Clark 1984; MAPA, 1999a*), trabajos de los que se deduce que la recarga es un medio efectivo para eliminar sustancias nocivas.

Según estos autores, lo que se debe tener muy en cuenta es la naturaleza del acuífero, la composición de los residuos y la interacción entre ambos.

- ***Naturaleza del acuífero***

Cualquier lugar susceptible de ser utilizado para la recarga de efluentes residuales deberá ser investigado desde el punto de vista geológico, haciendo un estudio pormenorizado de la presencia de drenes, anomalías hidrogeológicas, etc.

En el estudio geológico no se han detectado estructuras tectónicas importantes que puedan estar involucradas con la velocidad de infiltración de los efluentes. Tan sólo se ha apreciado una cierta adaptación de la cobertura sedimentaria a unas alineaciones del basamento, que funcionan como drenes de orientación NE-SO, a través de los cuales parece haber un drenaje de las aguas del acuífero, y, consecuentemente, de los efluentes infiltrados, hacia zonas de rezume existentes en la ladera del río Voltoya, como es el caso de la Cacara de Betaya, aliviadero natural del arroyo de la Ermita y del caz de recarga artificial tanto superficial como subálveo.

Edafológicamente, las características texturales del suelo son uniformes. Se trata de arenas eólicas bien seleccionadas homométricas y subredondeadas, con porosidad por empaquetado romboédrico. No se ha detectado ninguna distribución especial del tamaño de las partículas.

Las arcillas presentes aparecen en forma de vetas o lentejones esporádicos de escasa potencia, o bien en lentes. Suele aparecer en abundancia fracciones limosas y margosas, con frecuencia cementados por carbonatos. En las muestras observadas no se ha detectado indicios de materia orgánica ocluyendo los poros tras el primer ciclo de recarga, salvo en el fondo del caz de recarga artificial, por efecto de los procesos colmatantes (Aptdo. 4.3.1 del Bloque 5).

La capacidad de intercambio catiónico del suelo con el agua es relativamente baja, dado el carácter silíceo y ácido del terreno, si bien, con las arcillas presentes en el medio, es bastante mayor.

En cuanto a la distribución del tamaño del poro, a continuación se presenta una gráfica relativa a la capacidad de filtración de microorganismos dependiendo de la granulometría del suelo (Fig. 3.06 a). En ella se puede apreciar que para el tamaño modal de los granos de arena, calculado en 0,27 mm según el tratamiento de los datos resultantes de las granulometrías presentadas en el Apto. 6.1.2, retienen en zona no saturada la mayor parte de los hongos y protozoos presentes en el sistema, pudiendo alcanzar la zona saturada los restantes microorganismos dependiendo de su tiempo de residencia.

En los ensayos de permeabilidad realizados se ha estimado una permeabilidad vertical de hasta 5 m/día, por lo que la mayoría de los microorganismos pueden alcanzar el nivel freático en dos días con un gradiente hidráulico vertical inducido.

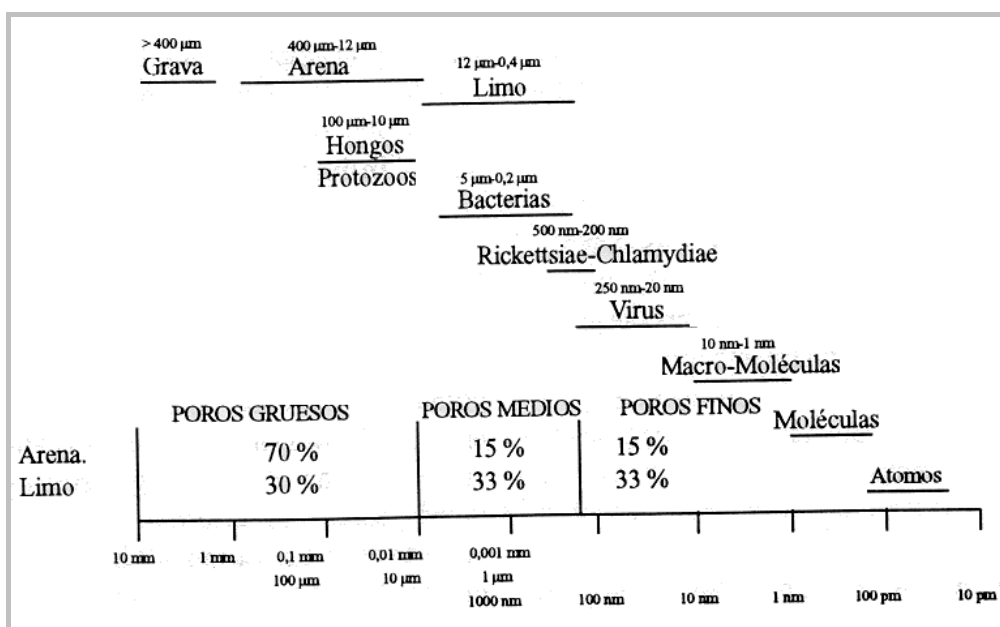


Fig. 3.06 a). Gráfico en el que se comparan el tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes de los poros. Fuente: ITGE, 1998.

Esta velocidad de propagación lógicamente depende del tipo de microorganismos presentes en las aguas grises, que, por lo general, son bacterias coliformes cuya pervivencia está supeditada a algunos factores como su densidad y dimensiones, la temperatura del suelo y ambiental, la humedad del suelo en zona no saturada, el flujo vertical, el tipo y concentración de iones en solución en el suelo, etc. Influyen además la naturaleza de la materia orgánica en suspensión y la competencia de la microfauna del suelo.

A continuación son desglosados los factores más influyentes.

– Cantidad de nutrientes

Es un factor limitante del desarrollo bacteriano. En el estudio realizado por el ITGE *“Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del Norte de España”* (en ITGE, 1990), se demuestra la correlación proporcional inversa entre el contenido en bacterias y el contenido en fósforo del agua. En cuanto al nitrógeno, la relación es dependiente del tipo de bacteria.

– Temperatura

La tasa metabólica bacteriana aumenta con la temperatura. Las bacterias parásitas del hombre en las aguas subterráneas desaparecen de forma más rápida al aumentar la temperatura

– Humedad

Las bacterias suelen desarrollarse mejor en medios con facilidad de retención de agua.

– pH y potencial Redox

Las bacterias sólo aparecen en rangos de pH de 4 a 9, que son rangos de aguas naturales. El Eh dependerá del tipo de bacteria que sea, aerobia o anaerobia, necesitando las primeras valores más altos de Redox que las segundas.

– Luz

La luz tiene efectos inhibidores sobre bacterias no pigmentadas. Los factores de la luz se ven modificados por otros factores como la temperatura.

– Presión hidrostática

Las bacterias de suelos y aguas dulces no crecen a presiones superiores a 200 atmósferas.

– Turbidez

Los factores que influyen en la turbidez son las partículas finas de origen mineral, los detritus constituidos por material inorgánico y orgánico y los microorganismos. Si el aumento de la turbidez conlleva un aumento de bacterias, suele ser debido a un aumento del contenido en materia orgánica.

– Salinidad

La salinidad influye de forma considerable en el tipo de microorganismos que hay en el agua dulce. El rango óptimo oscila entre 10-50 g/l de sales.

– Presencia de metales

Se ha observado que algunos metales en el agua tienen efectos bactericidas, como ocurre con el cobre, mercurio, plata, arsénico, selenio, etc.



– Gases

La mayoría de los microorganismos son anaerobios facultativos (se adaptan a presencia o ausencia de oxígeno). Se ha observado que las variaciones del contenido en oxígeno de las aguas subterráneas no afecta a las restantes aerobias, que no se desarrollarán en condiciones de presiones parciales de oxígeno bajas.

Según estudios de los autores citados, una zona no saturada de al menos 10 m de potencia asegura la capacidad del acuífero para depurar residuos. En la mayoría de la zona de estudio los niveles se encuentran en torno a esta profundidad, aunque cabe esperar un ascenso del nivel freático durante la recarga. La Fig. 3.06 b) representa la disminución del contenido de bacterias en zona no saturada en función de la litología y del espesor de la columna de suelo.

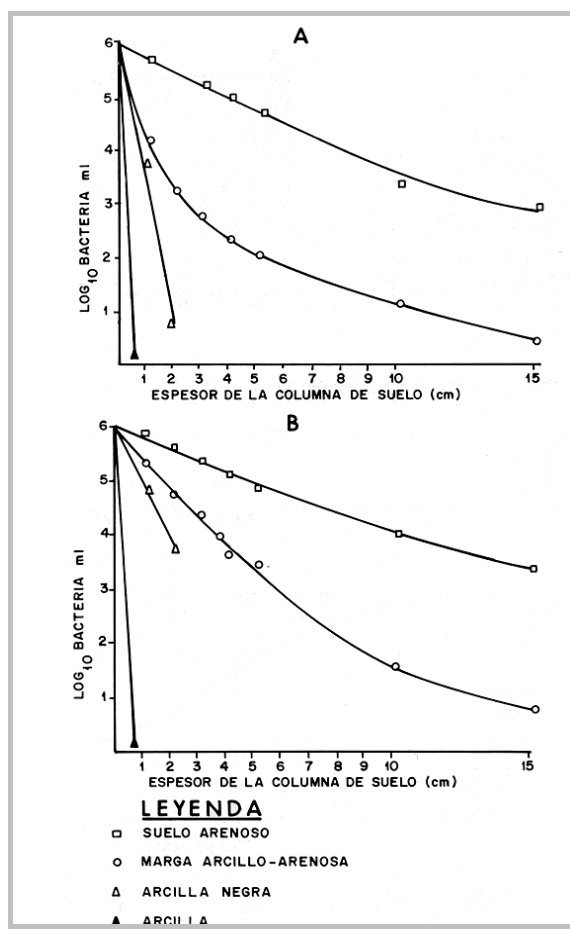


Fig. 3.06 b). Disminución del contenido en bacterias de un acuífero en función del tipo de material. Tomado de Weaver et al, 1978, en Crane & Moore, 1984.

En el estudio hidrogeológico realizado se han distinguido zonas con cierta heterogeneidad y anisotropía variables entre límites estrechos, por lo que inicialmente el acuífero superficial puede ser tratado como uniforme u homogéneo.

- **Contaminación química**



Los residuos caracterizados son altamente nitrogenados y clorurados y con contenidos bajos en hierro y manganeso. Presentan abundantes bacterias, escaso oxígeno disuelto y salinidad y demanda bioquímica de oxígeno altas.

La movilidad de los diferentes contaminantes químicos depende de su naturaleza y de las condiciones del medio. Los más importantes son:

– *Metales pesados*: su mayor o menor movilidad depende de la presencia de aniones con los que se puedan combinar formando compuestos más o menos solubles. En presencia de ácidos húmicos forman complejos en los que quedan retenidos de forma irreversible; por tanto, su concentración disminuye en las aguas subterráneas y adquieren un cierto retardo hasta que se incorporan a la zona saturada.

– *Hidrocarburos*: su origen está muy ligado a la actividad urbana o industrial. Antes de infiltrarse en el terreno pierden los volátiles, siendo posteriormente la dilución y la degradación bacteriana los responsables de su desaparición.

– *Plaguicidas*: la solubilidad en el agua es uno de los factores más importantes que influyen en su transporte. Si se producen retenciones por fenómenos de absorción, su eliminación será provocada por la degradación bacteriana.

- ***Contaminación bacteriológica***

Su procedencia es de las explotaciones ganaderas, industrias en general y vertidos urbanos (aguas grises) sobre todo.

Los microorganismos que se generan en los residuos industriales no suelen ser de patología dañina para el hombre, aunque se generan gran número de especies. Los vertidos urbanos generan un número de agentes patógenos bastante mayor, de los cuales algunos de estos microorganismos tienen parte de su ciclo de vida en medio hídrico, por lo que su tiempo de permanencia en el agua es mucho mayor.

La cinética de degradación (eliminación en bacterias, inactivación en virus) sigue la siguiente ley exponencial:

$$C_t = C_o \exp [-\lambda t (t-t_o)]$$

Donde:

- C_o = concentración inicial
- C_t = concentración a un tiempo
- λt = constante de eliminación de bacterias o de inactivación de virus.
- $\lambda t = 0.693/T$ siendo T el tiempo en el cual la mitad de bacterias o virus han desaparecido.

Los estudios realizados hasta la fecha en el acuífero desprenden unos valores que, en general, varían de 1 a 20 días para las bacterias, y de 10 a 100 días para los virus (MAPA, 1999a; Galán et al, 2002b).

Los siguientes gráficos son indicativos del tiempo de supervivencia de distintos tipos de bacterias (*Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*) y dos tipos de virus (poliovirus y fagos) en las aguas subterráneas (Figs. 3.07 a y b).

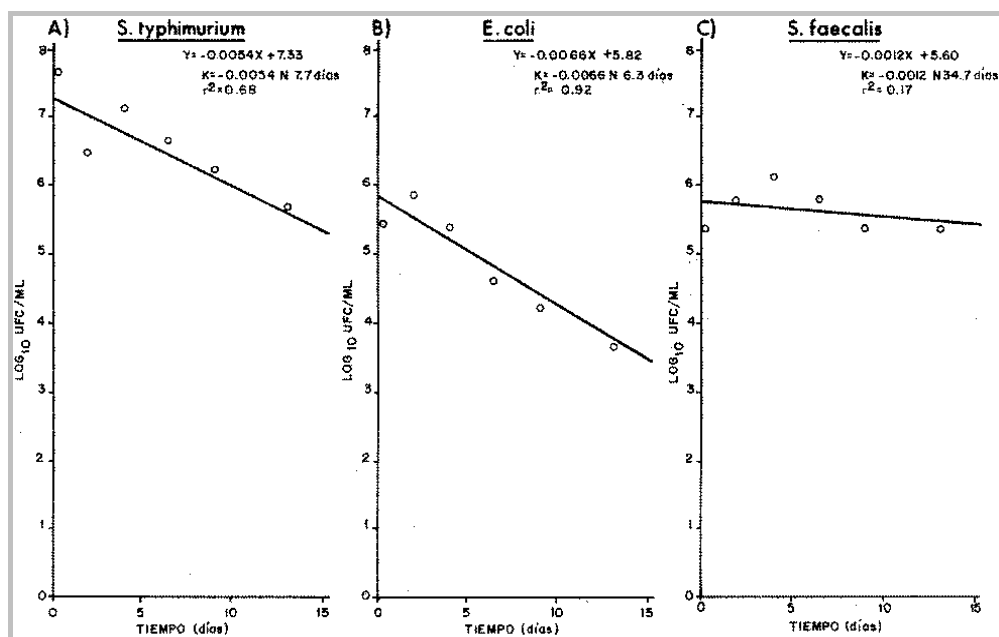


Fig. 3.07 a). Gráfico que muestra la supervivencia de varios tipos de bacterias en aguas subterráneas. Fuente: Bitton et al, 1983.

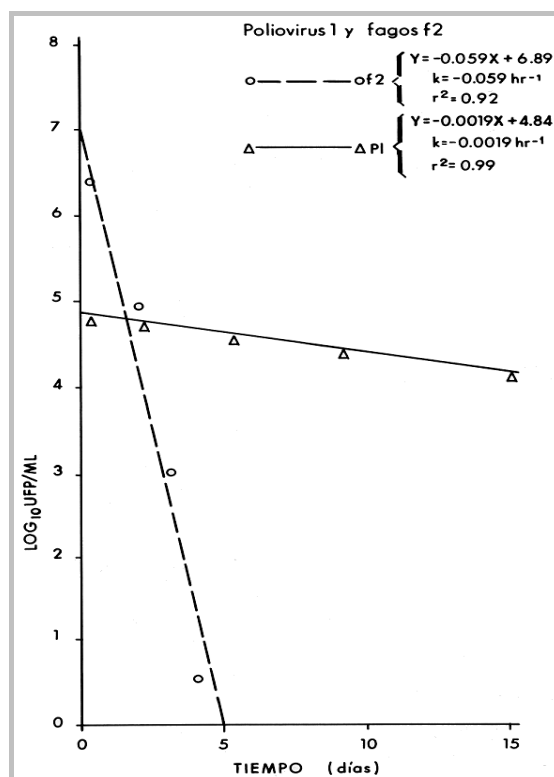


Fig. 3.07 b). Gráfico que muestra la supervivencia en aguas subterráneas de dos tipos de virus. Fuente: Bitton et al, 1983.

- ***Interacción entre la naturaleza del acuífero y la composición de los residuos***

La perdurabilidad de la contaminación en el agua subterránea radica principalmente en el tiempo de tránsito, que puede ser mayor que el período de degradación o inactivación del agente contaminante, en cuyo caso no se produce contaminación alguna del agua del acuífero o viceversa.

Si la permeabilidad es alta, como es el caso del acuífero de Los Arenales, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en zona saturada es alto dependiendo de la profundidad del nivel del agua.

No es previsible encontrar problemas de contaminación con metales pesados debido a que se asocian con los sólidos en suspensión de la disolución residual (*El-Nennah et al, 1983*).

5. FRACCIÓN LÍQUIDA: EL AGUA

En este apartado se pretende obtener una caracterización hidrogeoquímica de los principales acuíferos vinculados con el funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio, así como de los ambientes hidroquímicos generados, bien de forma natural (humedales) o artificial (evolución de las aguas subterráneas tras las operaciones de AR).

Por motivos operacionales, la fracción líquida se ha dividido en una serie de grupos, integrados a su vez por varios puntos de agua.

5.1. PUNTOS DE AGUA DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO

A continuación se citan y/o describen los puntos de agua que constituyen los seis grupos diferenciados en el sistema.

- Polos fríos del sistema.
- Red de control de la hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999).
- Red de control de la hidroquímica Fase operacional (RCH-2003).
- Puntos adecuados para la caracterización de ambientes. Fase postoperacional.
- Los procesos contaminantes. Distribución y evolución previsible.
- Humedales del Complejo de Coca-Olmedo.

En este mismo orden serán descritos y caracterizados estos grupos a continuación:

• Polos fríos del sistema

Este grupo corresponde a aquellas aguas originarias a partir de las cuales se generan los distintos ambientes hidroquímicos en el sistema. En este grupo quedan incluidas las aguas que son introducidas en el sistema procedentes de otros acuíferos, el agua de lluvia, etc.

• Red de control de la hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)

Conocida la profundidad a la que se encuentran los principales estratos productivos y de las captaciones que los atraviesan, la totalidad de los puntos ha sido dividida en tres subgrupos:

- **Captaciones de profundidad inferior a 75 m.** Estos puntos extraen agua del acuífero eólico superficial y de ciertas lentes y vetas de escasa importancia y extensión intercaladas en la serie detrítica marga-arcillosa que constituye el techo del acuífero terciario. Tres de estos puntos están situados en las inmediaciones del caz de recarga (RCH 11, 23 y 24) y tres de ellos más están bajo la influencia de la cacera de vertido de aguas residuales de la localidad de Santiuste (n.º 196, 198 y



199), lo que permite ver la interacción contaminante entre los vertidos y la calidad del acuífero en sus inmediaciones.

- **Captaciones entre 75 y 150 m.** En este rango de profundidades se encuentra una serie de estratos y vetas con comportamiento acuífero o acuitado, de naturaleza tobácea, detrítica y calcárea. Se trata de niveles formados por esporádicos episodios sedimentarios detríticos y carbonáticos sin-miocenos. Las captaciones que extraen agua cuya calidad es representativa de estos niveles, de acuerdo con la numeración del inventario de puntos de agua del Anexo 2.5, son: 67, 131, 159 y 217.
- **Captaciones más profundas de 150 m.** Se trata de sondeos profundos que captan agua de los compartimentos acuíferos o acuitados de la base del Mioceno. Se trata de facies más salinizadas que las anteriores, con cierta importancia en los procesos degenerativos de la calidad hidroquímica de las aguas para riego y cuya hidroquímica es representativa del sistema de flujo regional. Los sondeos profundos seleccionados han sido: 33, 63, 70 y 314.

El hecho de que en la mayoría de los sondeos estén diseñados para su explotación, sin aislamientos o cementaciones, motiva que los sondeos de mayor profundidad experimenten en su interior mezclas de aguas procedentes de varios niveles acuíferos, tanto superficiales como profundos. A pesar de ello se ha apreciado una gran variedad composicional en las alícuotas del área de estudio.

- **Red de control de la hidroquímica. Fase operacional (RCH-2003)**

El filtrado de los puntos de la red anterior ha llevado a diseño de una nueva red más operativa que diferencia dos acuíferos en la vertical, el superficial y el profundo o regional. Los niveles intermedios resultantes de procesos de mezclas de aguas han sido omitidos dado su carácter puntual y su escasa representatividad.

- **Puntos adecuados para la elaboración de perfiles hidroquímicos y determinación de ambientes hidrogeoquímicos. Fase postoperacional.**

Estos puntos son los ubicados en las inmediaciones del caz de recarga, extraídos de las redes anteriores para estudiar los principales procesos originados por mezclas de aguas e interacción con el acuífero. De acuerdo con los objetivos trazados, los procesos más relevantes son aquellos que desvelan la evolución de iones muy importantes para el sistema y su evolución, como son el hierro, manganeso, oxígeno disuelto en el agua, nitratos, calcio, etc. El estudio de su evolución y concentración permitirá dividir el sistema en ambientes hidroquímicos y deducir las principales reacciones químicas que ocurren en el seno del acuífero tras las operaciones de AR.

- **Humedales del Complejo de Coca-Olmedo**

Su importancia ecológica lleva a establecer un grupo específico, si bien existe una gran carencia de datos analíticos, por lo que el tratamiento de los datos es colateral tendente a establecer una serie de técnicas que permitan su recuperación mediante operaciones de AR.



5.1.1. Definición de la Red de Control de la Calidad (RCC)

El estudio de la calidad de las aguas subterráneas de la zona del Proyecto se ha planteado de forma similar al de otros parámetros con variabilidad en el espacio y en el tiempo (piezometría, caudales, etc.).

En primer lugar se ha realizado una recopilación y análisis estadístico e hidrogeológico de todos los datos históricos existentes hasta la fecha, tras de lo cual se ha procedido a diseñar y controlar una red definitiva de control de la calidad.

La red de control de calidad operada por el IGME-DGOHCA en 1996 ascendía a 92 puntos para la Cuenca del Duero, con un total de 153 medidas históricas (*MIMAM, 1998a*).

El diseño de la red de control de la calidad ha sido realizada al termino del inventario y de las campañas de prospección geofísica, con objeto de disponer de “información de base” suficiente, que ha sido analizada en gabinete.

Los criterios seguidos para el diseño de la Red de Control de la Calidad (RCC)¹ son, en general, de carácter estrictamente hidrogeológico. Cabe destacar la profundidad de la captación, detección de acuíferos colgados, temperatura anómala del agua, valores de conductividad alejados de la media, cercanía a focos contaminantes y ubicación con respecto a la reconstrucción geométrica del acuífero cuaternario a partir de los datos obtenidos en la campaña de prospección geofísica.

Otros criterios a tener en cuenta son la renovación del agua del acuífero (captaciones en uso) con objeto de que las aguas sean representativas, facilidad del muestreo, accesibilidad al punto, distribución homogénea en el espacio de los puntos seleccionados, de manera que no queden sectores del acuífero sin información, etc.

La red diseñada consta de 28 puntos de agua, ocho de los cuales corresponden a sondeos profundos y 20 son pozos o sondeos de profundidad menor a 75 m. Su muestreo y análisis inicial fue realizado en el verano de 1999, y el segundo en febrero de 2003 de manera simultánea a las operaciones de AR. La segunda red difiere de la primera en determinados aspectos, al haber sido clausuradas varias captaciones y haber priorizado captaciones cercanas al dispositivo de recarga sobre otras desconectadas del funcionamiento general, como son las perforaciones de 75 a 150 metros con abundancia de procesos de mezcla de aguas. La descripción de todos los puntos aparece en los trabajos de *MAPA (1999)*, *Galán et al (2001b)*, y *Fdez. Escalante y López (2002a)*.

Los datos se han procesado inicialmente en tres bloques en la primera etapa, uno para captaciones de profundidad inferior a 75 m, otro para muestras tomadas en sondeos de 75 a 150 m y otro para muestras de sondeos más profundos. En la segunda etapa se han excluido los puntos del grupo intermedio por su escasa representatividad. En todos ellos se han determinado parámetros inestables *in situ*, macroconstituyentes en

¹ La Red de Control de la Calidad equivale a la Red de Control de la Hidroquímica en la notación empleada por el MAPA (*en MAPA, 1999a y 2003*).

laboratorio y realizado un análisis estadístico de los datos, estudio mediante hidrogramas específicos, así como cartografías temáticas.

5.1.2. Polos fríos del sistema

Se han realizado determinaciones esporádicas de aquellos puntos que se considera que constituyen los **polos extremos** de los procesos de interacción, es decir, se encuentran en posiciones iniciales del sistema de interacción aguas-suelo en la zona de estudio.

Los resultados analíticos se presentan de manera separada en el Anexo 3.1.1.1, con objeto de facilitar su observación simultánea a la lectura del texto. Su posición se presenta en la Fig. 3.11. Los puntos de agua incluidos en el grupo “polos fríos” son:

- **Agua de lluvia**

Se ha procedido al muestreo y análisis en laboratorio de una muestra de agua de lluvia tomada en el pluviómetro de la estación 2502 de Santiuste de San Juan Bautista (Fig. 3.08 a).

- **Agua de recarga procedente del río Voltoya**

Se ha procedido al muestreo, determinación de parámetros inestables “*in situ*” y análisis en laboratorio de dos muestras de agua del río Voltoya empleadas para la recarga artificial en diferentes períodos y lugares de muestreo.

Algunos de los puntos de muestreo y observación se presentan en las Figs. 3.08 b) y 3.08 c), correspondientes a la cabecera del caz de recarga u “*hongo*”, según es designado por la población local; y la zona de manantiales de los “Prados del Amor”, en el talud del río Voltoya.

- **Manantiales que introducen agua en el sistema**

Se han detectado e inventariado dos manantiales situados en el contacto del terciario con el borde del acuífero. Las líneas de flujo indican que se trata de un agua transferida desde una zona aledaña, con unas características propias y no influidas por la “*formación almacén*” que se pretende recargar. Los puntos han sido designados:

- Polo frío S.O.

Entrada de una transferencia subterránea y arroyo superficial por el extremo SO de la *Cubeta* (Torrecilla), al sur del casco urbano de Santiuste.

- Polo frío O₂.

Entrada de una transferencia subterránea por el collado del “*Alto del Sanchón*”, con alumbramiento de aguas en un pequeño manantial. Estos manantiales corresponden a los puntos de agua 248 y 312 del inventario. Su aspecto se presenta en las Figs. 3.09 a) y b) y 3.10. a) y b).



Fig. 3.08 a). Fotografía de la Estación completa 2502 del INM. Santiuste de San Juan Bautista.



Fig. 3.08 b). Cabecera del caz de recarga artificial u “Hongo”, en Santiuste de San Juan Bautista.



Fig. 3.08 c). Zona de descarga del acuífero “Los Prados del Amor”.



Figs. 3.09 a) y b). Dos aspectos del Polo frío Suroeste (manantial y fuente de la Torrecilla). con transferencia subterránea a través del colector del Estanquillo y bajo la fuente. Sept. de 2002.



Figs. 3.10 a) y b). Polo frío oeste. Entrada de agua al sistema por un collado entre las colinas que delimitan la Cubeta por el oeste, con transferencia subterránea por el collado del “Alto del Sanchón.” Julio de 2002.

También se han realizado puntuales mediciones de parámetros inestables a lo largo del caz de recarga.

Todos los datos recopilados o medidos relativos a la hidroquímica de los polos fríos se presentan en los Anexos 3.1.1.1 y 3.1.1.2. La estructura de la tabla es:

- Respectivamente se presentan los parámetros de los polos fríos para el agua del río Voltoya, agua de lluvia, agua de recarga medida en el caz y manantiales.
- El formato de presentación de las características básicas es común con el del inventario de puntos de agua.
- Las concentraciones de los iones macroconstituyentes están en mg/l.

Además hay varios datos de calidad de las aguas superficiales del río Eresma en la estación de Coca en poder de la CHD, si bien estos datos se consideran de escasa relevancia para los fines propuestos.

5.1.3. Red de control de la hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)

Las etapas de medición y determinación de parámetros han variado de acuerdo con los objetivos inicialmente previstos. Las tres primeras presentan un orden cronológico lineal posicionadas antes, durante y después del primer año de recarga artificial. Los dos grupos restantes han sido analizados de acuerdo con las necesidades específicas en distintas etapas del trabajo. En algunos casos ha sido preciso contar con análisis procedentes de referencias bibliográficas, especialmente en el caso de los humedales del *Complejo*.

En total fueron seleccionados 28 puntos de agua de relevancia hidroquímica y distribuidos de forma homogénea por el *territorio* (MAPA, 1999a). Estos puntos constituyen la que fue designada “*Red de Control de la Hidroquímica*” (en adelante **RCH-99**), empleada para caracterizar el acuífero en la fase preoperacional.

En los Anexos 3.1.2.1 y 3.1.2.2 se presentan los resultados analíticos de los puntos de agua con determinaciones químicas.

La posición de todos ellos se presenta en la Fig. 3.11.

5.1.4. Red de control de la hidroquímica Fase operacional (RCH-2003)

Posteriormente fue diseñada una nueva red de control, integrada por el mismo número de puntos, con objeto de estudiar la evolución hidroquímica de las aguas, con ligeras variaciones con respecto a la red previa. Esta nueva red, designada **RCH-03**, ha servido para caracterizar el acuífero en la fase operacional y estudiar las variaciones en las aguas subterráneas (MAPA, 2003).

Los resultados de la analítica se presentan tabulados en el Anexo 3.1.3.1. y su posición en la Fig. 3.11.

5.1.5. Puntos adecuados para la elaboración de perfiles hidroquímicos y determinación de ambientes hidrogeoquímicos. Fase postoperacional

Al término de la primera fase de recarga fue realizada una nueva campaña de determinación de parámetros inestables *in situ* evaluando aquellos parámetros con mayor

grado de variabilidad en las operaciones de recarga artificial, según las experiencias analizadas en el estudio de antecedentes.

Esta campaña fue realizada en verano de 2003 en puntos adyacentes al caz de recarga especialmente seleccionados para la realización de perfiles hidroquímicos y determinación de ambientes hidrogeoquímicos en fase postoperacional.

Los resultados de la analítica se presentan tabulados en el Anexo 3.1.4.1. La estructura de las tablas es la siguiente:

- Concentración en miligramos por litro de los principales iones macroconstituyentes (sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y nitratos, sílice, ácido silícico, conductividad y pH).
- Facies hidroquímica en base a la composición relativa de los constituyentes.
- Observaciones.

La posición de los puntos que integran esta red se presenta en la cartografía de la Fig. 3.11 (puntos de interés hidroquímico).

5.1.6. Humedales del Complejo de Coca-Olmedo

Como complemento al conocimiento del sistema, se consideran de sumo interés los **humedales del Complejo de Coca-Olmedo** (e.a. el *Complejo*), por tratarse de puntos muy importantes en la determinación de paleoambientes hidrogeológicos en la zona de estudio, por su vinculación al flujo regional de las aguas subterráneas y especialmente por contemplarse su recuperación medioambiental como uno de los principales objetivos de este trabajo de investigación (Bloque 5).

El croquis de situación y muestreo de los humedales se ha postergado para el Bloque 4, dado que tan sólo se ha conseguido una analítica suficientemente completa de dos humedales de la zona. En cambio, se han determinado los parámetros inestables en la mayoría de los humedales, cuyos datos están tabulados en el próximo apartado.

El inventario y tipificación es abordado con detalle en el Bloque 4. Las determinaciones químicas disponibles se presentan en el Anexo 3.1.5.2, *Humedales del Complejo de Coca-Olmedo, Resultados Analíticos*.

Los resultados de la analítica se presentan tabulados en los Anexos 3.1.5.1 y 3.1.5.2.

Todos los puntos de interés hidrogeoquímico mencionados (redes de control, polos fríos y análisis de aguas superficiales) se presentan en la cartografía adjunta (Fig. 3.11) a escala 1:50.000.

5.2. FASES DE MUESTREO Y ANÁLISIS *IN SITU*

Simultáneamente a la realización de las campañas de muestreo se ha llevado a cabo la determinación de los principales parámetros inestables *in situ*.

La primera campaña de muestreo fue realizada entre los días 22 y 30 de julio de 1999, previamente al comienzo de las obras de las estructuras de recarga artificial.

La segunda campaña fue realizada entre los días 18 y 21 de febrero de 2003, cuatro meses más tarde de iniciadas las operaciones de recarga artificial.

Las determinaciones relativas a parámetros inestables en los puntos seleccionados para la elaboración de perfiles hidroquímicos y ambientes se ha realizado entre los días 15 de julio y 8 de agosto de 2003.

Las determinaciones en los puntos que constituyen polos fríos o extremos de los procesos de interacción se han realizado esporádicamente a medida que surgía la necesidad o conveniencia.

El polo frío suroeste fue muestreado y analizado en febrero de 2003; el oeste, en julio de 2003; el muestreo de agua de lluvia del pluviómetro de la estación 2502 de Santiuste de San Juan Bautista, el 13 de marzo de 2003; el agua de recarga del río Voltoya ha sido muestreada y analizada en Prados del Amor, en verano (1 de julio de 2002), mientras que en la cabecera de la estructura de recarga se analizó el 18 de febrero de 2003.

De forma adicional, se han realizado numerosas medidas de parámetros inestables en el agua de recarga, que se resumen en la tabla del Anexo 3.1.1.2, *polos fríos del sistema, determinación de parámetros inestables*.

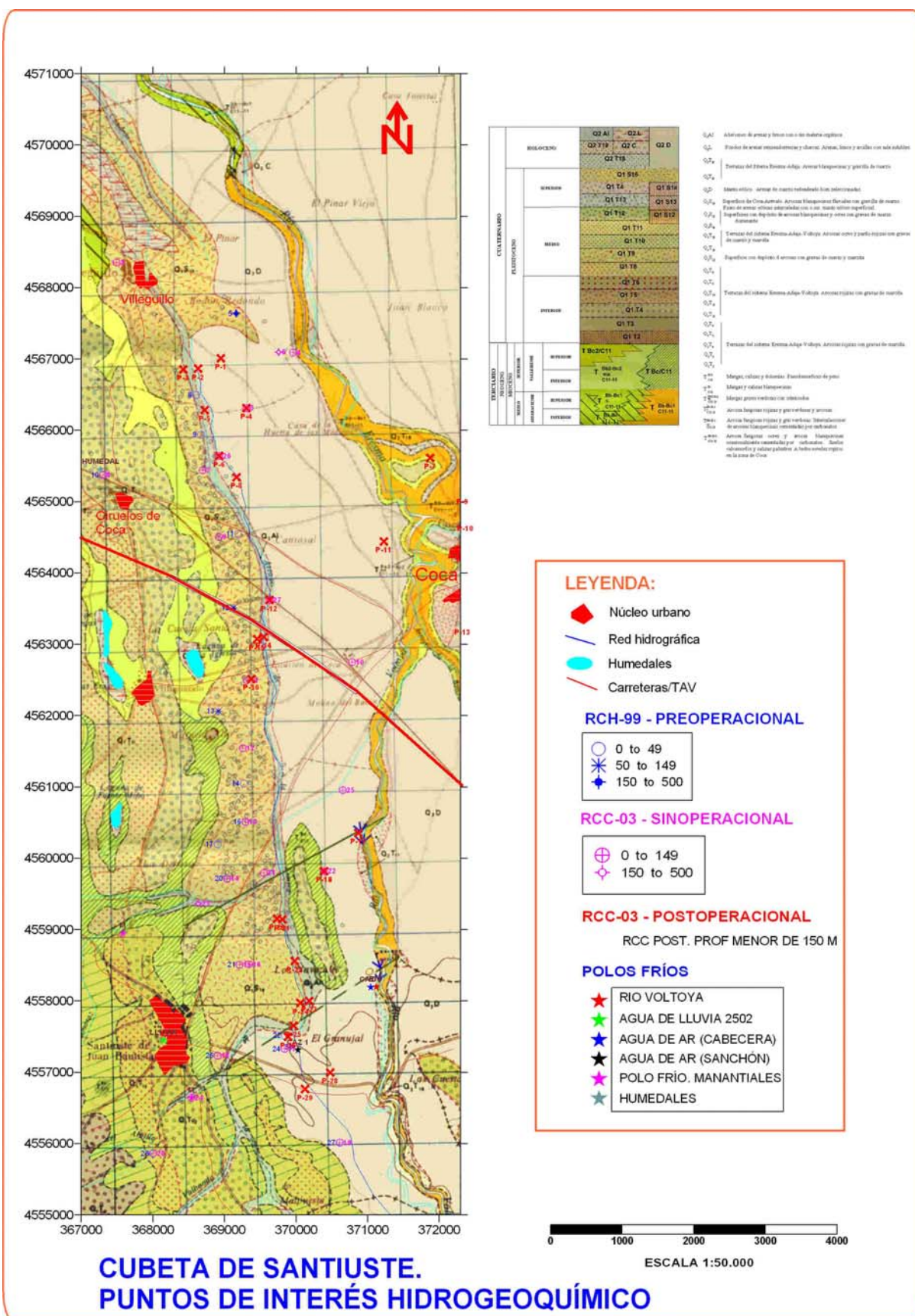
También se han determinado los parámetros inestables de todos los humedales del Complejo de lagunas salinas de Coca-Olmedo con lámina de agua durante el verano de 1999, 2002 y 2003, contando con análisis de las aguas de dos de los humedales, n.º 19 y 46 del inventario, el de los Majuelos, en Llano de Olmedo, muestreado en julio de 2003, y un humedal innominado en Ciruelos de Coca, muestreado en julio de 1999 y analizados los parámetros inestables en agosto de 2003.

Los resultados de la analítica se presentan en el Anexo 3.1.5, humedales del *Complejo de Coca-Olmedo*.

De este modo quedan establecidos todos los datos disponibles para llevar a cabo la caracterización del sistema, tarea llevada a cabo en el próximo apartado.

Fig. 3.11. Mapa de situación de los puntos considerados de interés hidrogeoquímico en la zona de estudio. Redes de control y polos fríos (página siguiente).







5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LA FASE ACUOSA

Las fases imprescindibles para llevar a cabo una caracterización dependen de la cantidad de datos disponibles y de los objetivos pretendidos, consecuentemente, los distintos grupos establecidos van a ser caracterizados siguiendo un esquema común, si bien este puede variar en aras de la efectividad.

A continuación se presenta la caracterización de las aguas de las distintas etapas operacionales, de acuerdo con los parámetros y cálculos realizados.

5.3.1. Caracterización de los “polos extremos o fríos”

Características de las aguas que integran los polos extremos o fríos del sistema. Se trata del estadio inicial para los procesos de interacción agua-roca, por tanto, no han sido generadas por reacciones químicas acontecidas en el seno del acuífero que se pretende recargar.

Dado que el agua originaria de la *Cubeta* será el resultado de procesos de mezcla e interacción entre esta agua y el acuífero, los polos fríos son tratados globalmente a efectos operativos como constituyentes del agua final.

Los datos analíticos de las alícuotas se presentan en el Anexo 3.1.1.1, *polos fríos del sistema, resultados analíticos*.

Destacamos los siguientes polos fríos:

- **Agua de lluvia**

La muestra obtenida del pluviómetro de la estación 2502, Santiuste de San Juan Bautista. Se trata de un agua joven clorurada y bicarbonatada cálcico y magnésica (según la clasificación de *Schoukarev-Slavianov*) de mineralización muy débil.

Su balance iónico es de $-10,49\%$, lo que indica que se trata de un agua inestable, de alta capacidad de reacción y fuerza iónica con gran avidez por reaccionar. En este intervalo no cabe esperar errores analíticos importantes. Es previsible que el agua presente una alta concentración de gases disueltos, causantes en gran medida de la descompensación iónica advertida.

La única concentración destacable es la presencia de amonio ($0,81\text{ ppm}$) y nitratos (casi 3 ppm), producto de la interacción del agua de lluvia con el NO_x atmosférico.

La concentración en magnesio también es especialmente alta, proporcionalmente superior al agua del acuífero. El origen atmosférico del magnesio no está claro, por lo que su procedencia más lógica es del polvo atmosférico originado en la misma zona de estudio.

La presencia de minerales disueltos es similar a la mayoría de las facies presentes, solo que en concentración muy inferior (halita, silvita, anhidrita, carbonatos, yeso y cuarzo/feldespatos).

Para facilitar el acceso a sus propiedades químicas se ha complementado este análisis con métodos gráficos, resultando el más recomendable según autores el diagramas de Piper (*Güler et al, 2002*).

Los hidrogramas de *Piper-Hill-Langelier* que se presentan al final del apartado confirman que se trata de un agua poco evolucionada, así como los hidrogramas de *Stiff* indican que son de mineralización muy baja.

• Manantiales

Entradas al acuífero procedente de acuíferos externos a través de transferencias subterráneas con fuentes asociadas. Se han diferenciado dos manantiales designados “polo frío suroeste” y “polo frío oeste”, correspondiente a los puntos de agua 248 y 312 del inventario.

Son aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas en el extremo suroeste, mientras que en el oeste son bicarbonatadas y cloruradas cálcicas, lo que indica un grado evolutivo más avanzado.

El balance iónico es muy bajo (0,74 y -26,25 %) lo que indica que el primer agua se encuentra muy bien compensada iónicamente, mientras que la segunda presenta errores analíticos importantes y además carece de la determinación de algún ión macroconstituyente, como podría ser la sílice.

El agua más joven es la del polo frío SO, zona de cabecera de la *Cubeta* atendiendo a la posición del gradiente hidráulico. La presencia de sílice en el sistema es muy baja, indicando una escasa incidencia de los procesos de interacción agua-suelo, dada la naturaleza del suelo predominantemente silíceo.

Los minerales disueltos tipo halita y anhidrita inducen a pensar en que las aguas han interactuado con facies terciarias antes de alcanzar estas fuentes, lo que resulta lógico dado el carácter endorreico de la subcuenca y la presencia afloramientos de facies Cuestas alrededor. En el polo frío Oeste se detecta una mayor influencia de sílice en el sistema, a pesar de no haber sido analizado este componente.

La presencia de magnesio en el sistema es relativamente alta con respecto a otros puntos de agua del acuífero. Su procedencia más probable es por interacción con margas terciarias dolomíticas.

Los hidrogramas de *Piper-Hill-Langelier* que se presentan al final del apartado confirman que se trata de aguas jóvenes, aunque lógicamente más evolucionadas que el agua de lluvia, estando más salinizada la del polo frío oeste que en el suroeste. La tendencia evolutiva es a aumentar en cloruros, sulfatos, sodio y nitratos y disminuir su concentración en magnesio por intercambio catiónico con calcio y sílice y bicarbonatos por “mineralización por envejecimiento”.

• Agua de recarga procedente del río Voltoya

Con objeto de estudiar la evolución de las aguas superficiales, se ha realizado una consulta al Ministerio de Medio Ambiente, con objeto de ver qué estaciones de la Red ICA-COCA (Control de Calidad de las aguas superficiales), y SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas) se encuentran en este cauce y qué datos históricos hay. El resultado es una estación en el cauce del río Eresma, en Segovia, sin presencia de determinaciones más cercanas.

Se han recabado datos de calidad de las aguas fluviales en la CHD y analizado dos muestras en el agua de recarga al inicio de un ciclo de recarga y a mediados del mismo, con objeto de estudiar la variabilidad.

Las aguas de recarga analizadas fueron muestreadas directamente del río Voltoya en la zona de “*Prados del Amor*” después de su derivación, y en la cabecera de la estructura de recarga. La primera muestra fue tomada en verano de 2002 y la segunda en invierno de 2003, lo que resulta indicativo de que existe una amplia variabilidad entre ambas.

Dado que la recarga se lleva a cabo durante el período invernal, resulta más apropiado considerar la segunda muestra a efectos de cálculos.

La alícuota invernal presenta una mineralización mucho más débil, con una conductividad de 165 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La composición aniónica de estas muestras varían proporcionalmente entre límites estrechos, según se aprecia en los hidrogramas de Stiff y en el triángulo inferior derecho del hidrograma de Piper-Hill-Langelier, si bien las diferencias catiónicas son más acusadas, apreciándose una mayor concentración de calcio y sodio en el período estival que es reemplazado por magnesio en el invernal (triángulo inferior izquierdo).

La cantidad de nitratos es reducida (en torno a 3 ppm) y el pH relativamente básico (8) a pesar de que el río Voltoya tiene una cuenca de recepción principalmente granítica.

El oxígeno disuelto en el agua oscila en general entre 8,8 y 10,6 ppm, apreciándose un enriquecimiento en oxígeno a medida que el agua avanza por el caz de recarga, por disolución directa del aire atmosférico y el batido de las aguas en las paradas por efecto *cascading*.

Se ha realizado un análisis estadístico multivariante con objeto de establecer los rangos de variabilidad entre los polos fríos del sistema. Dicho análisis se presenta en las tablas siguientes en mg/l (Tablas 3.03 a 3.06), y en meq/l (Tablas 3.07 a 3.10). En ellas están tabulados los valores mínimos y máximos en los principales iones, la conductividad y el pH, así como la media, desviación estándar, típica y porcentaje del coeficiente de variación.

Junto con estos datos se han calculado las matrices de correlación entre una serie de parámetros preestablecidos, que son los iones macroconstituyentes, conductividad y pH de las cinco alícuotas, a modo de análisis estadístico multivariante. Estas matrices permiten

calcular el coeficiente de correlación entre los distintos elementos, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión.

Análisis estadístico multivariante:

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef Var (%)
Na	1.29	38.0	23.066	15.342	66.513	97.0
Ca	4.81	102.0	52.67	40.891	77.637	95.0
Mg	1.45	22.0	6.47	8.795	135.934	93.0
Cl	4.96	96.0	40.192	35.908	89.342	95.0
SO4	2.0	35.0	13.788	15.967	115.805	94.0
pH	6.94	8.1	7.476	7.34	98.188	14.0
Cond	40.0	932.0	493.4	388.057	78.65	96.0
K	0.16	4.0	2.118	1.361	64.257	96.0
HCO3	23.19	302.0	178.838	120.896	67.601	92.0

Tabla 3.03. Polos fríos. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	1.0	0.975	0.49	0.734	0.65	0.664	0.902	0.881	0.994
CA		1.0	0.604	0.689	0.686	0.507	0.896	0.873	0.99
MG			1.0	5.9E-2	0.418	0.161	0.426	0.779	0.5
CL				1.0	0.877	0.634	0.921	0.467	0.731
SO4					1.0	0.49	0.909	0.556	0.66
PH						1.0	0.651	0.673	0.579
Cond							1.0	0.752	0.902
K								1.0	0.853
HCO3									1.0

Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	0.0	-7.25	-9.9E-3	0.549	-1.82	7.26	-32.66	0.316	-1.75
CA		0.0	-0.37	8.34	-0.311	7.41	45.61	0.588	24.74
MG			0.0	38.64	8.88	7.66	371.79	1.34	134.35
CL				0.0	-1.88	7.39	93.5	1.41	79.98
SO4					0.0	7.52	188.92	1.46	109.98
PH						0.0	-3.8E+3	-13.33	-1.0E+3
Cond							0.0	0.816	40.19
K								0.0	18.33
HCO3									0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	1.0	2.6	0.281	1.72	0.677	2.0E-2	22.81	7.8E-2	7.83
CA		1.0	0.13	0.605	0.268	5.7E-3	8.5	2.9E-2	2.93
MG			1.0	0.24	0.759	8.4E-3	18.8	0.121	6.88
CL				1.0	0.39	8.1E-3	9.95	1.8E-2	2.46
SO4					1.0	1.4E-2	22.08	4.7E-2	4.99
PH						1.0	552.0	2.0	152.95
Cond							1.0	2.6E-3	0.281
K								1.0	75.78
HCO3									1.0

Tabla 3.04. a 3.06. Polos fríos. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.



	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var (%)
Na	0.056	1.653	1.003	0.667	66.513	97.0
Ca	0.24	5.09	2.628	2.04	77.637	95.0
Mg	0.119	1.81	0.532	0.724	135.934	93.0
Cl	0.14	2.708	1.134	1.013	89.342	95.0
SO4	0.042	0.729	0.287	0.332	115.806	94.0
pH	6.94	8.1	7.476	7.34	98.188	14.0
Cond	40.0	932.0	493.4	388.057	78.65	96.0
K	0.004	0.102	0.054	0.035	64.257	96.0
HCO3	0.38	4.95	2.931	1.982	67.601	92.0

Tabla 3.07. Polos fríos. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	1.0	0.975	0.49	0.734	0.65	0.664	0.902	0.881	0.994
CA		1.0	0.604	0.689	0.686	0.507	0.896	0.873	0.99
MG			1.0	5.9E-2	0.418	0.161	0.426	0.779	0.5
CL				1.0	0.877	0.634	0.921	0.467	0.731
SO4					1.0	0.49	0.909	0.556	0.66
PH						1.0	0.651	0.673	0.579
Cond							1.0	0.752	0.902
K								1.0	0.853
HCO3									1.0

Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	0.0	-0.362	-8.1E-4	1.5E-2	-3.8E-2	7.26	-32.66	8.1E-3	-2.9E-2
CA		0.0	-3.0E-2	0.235	-6.5E-3	7.41	45.61	1.5E-2	0.406
MG			0.0	1.09	0.185	7.66	371.79	3.4E-2	2.2
CL				0.0	-3.9E-2	7.39	93.5	3.6E-2	1.31
SO4					0.0	7.52	188.92	3.7E-2	1.8
PH						0.0	-3.8E+3	-0.341	-16.41
Cond							0.0	2.1E-2	0.659
K								0.0	0.3
HCO3									0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	1.0	2.98	0.531	1.11	0.324	0.455	524.33	4.6E-2	2.95
CA		1.0	0.214	0.342	0.112	0.114	170.37	1.5E-2	0.961
MG			1.0	8.2E-2	0.192	0.102	228.47	3.7E-2	1.37
CL				1.0	0.288	0.287	352.75	1.6E-2	1.43
SO4					1.0	0.674	1.1E+3	5.8E-2	3.93
PH						1.0	552.0	5.1E-2	2.51
Cond							1.0	6.7E-5	4.6E-3
K								1.0	48.57
HCO3									1.0

Tabla 3.08. a 3.10. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.



– Índices hidrogeoquímicos

Dada la alta variabilidad genética de las muestras y su reducido número, la información aportada por determinados índices acerca del grado evolutivo de esta agua es facilitada también por el hidrograma de Piper-Hill-Langelier.

– Clasificaciones de aguas

Las facies hidroquímicas de las muestras de acuerdo con la clasificación de Schoukarev-Slavianov son:

- AGUA LLUVIA: $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-Cl}$
- AGUA RECARGA: $\text{Ca-Na-Mg-HCO}_3\text{-Cl}$
- POLO FRIO O: $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$
- POLO FRIO SO: Ca-Mg-HCO_3
- RIO VOLTOYA EN Santiuste: $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$

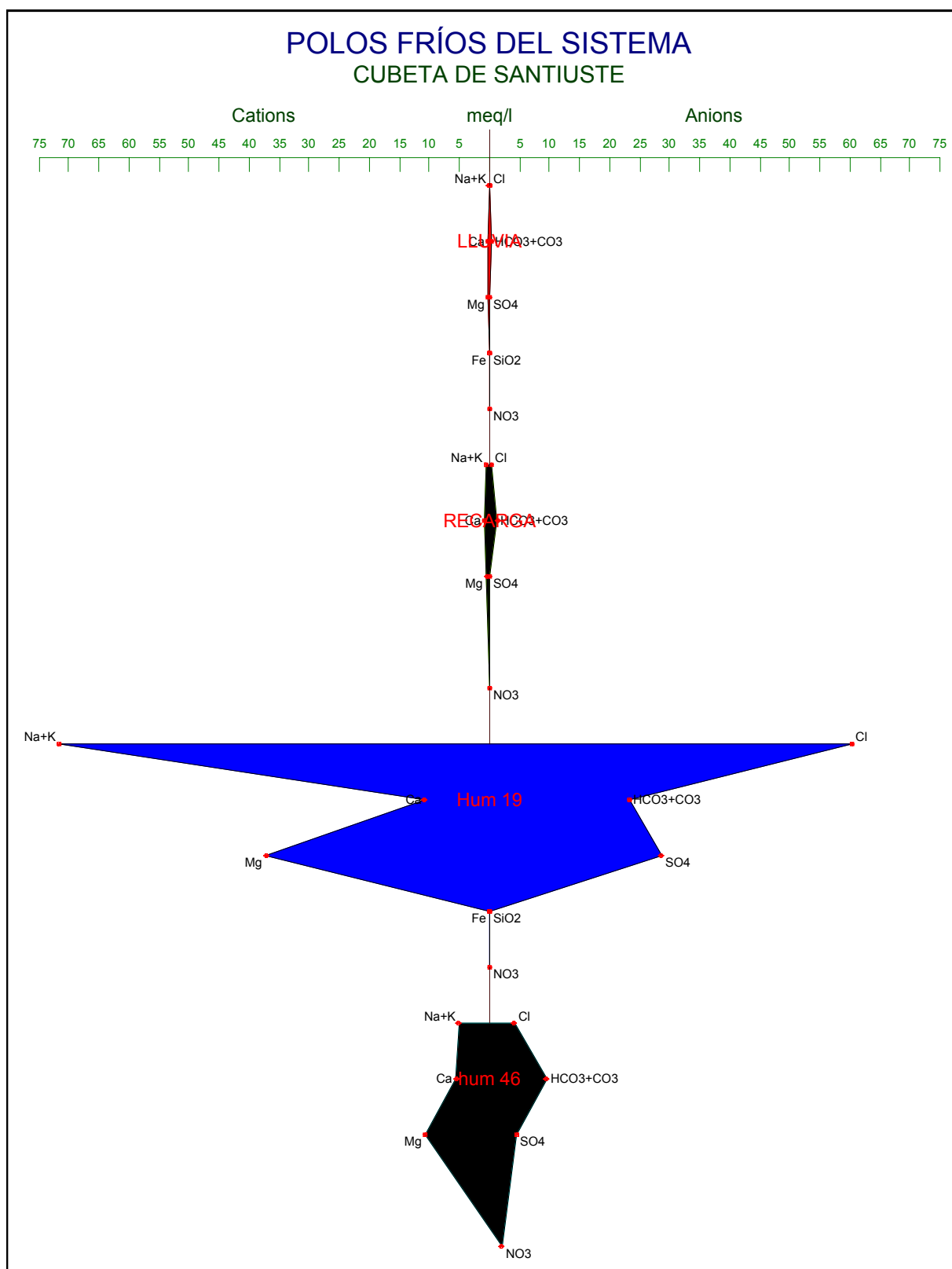
– Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas

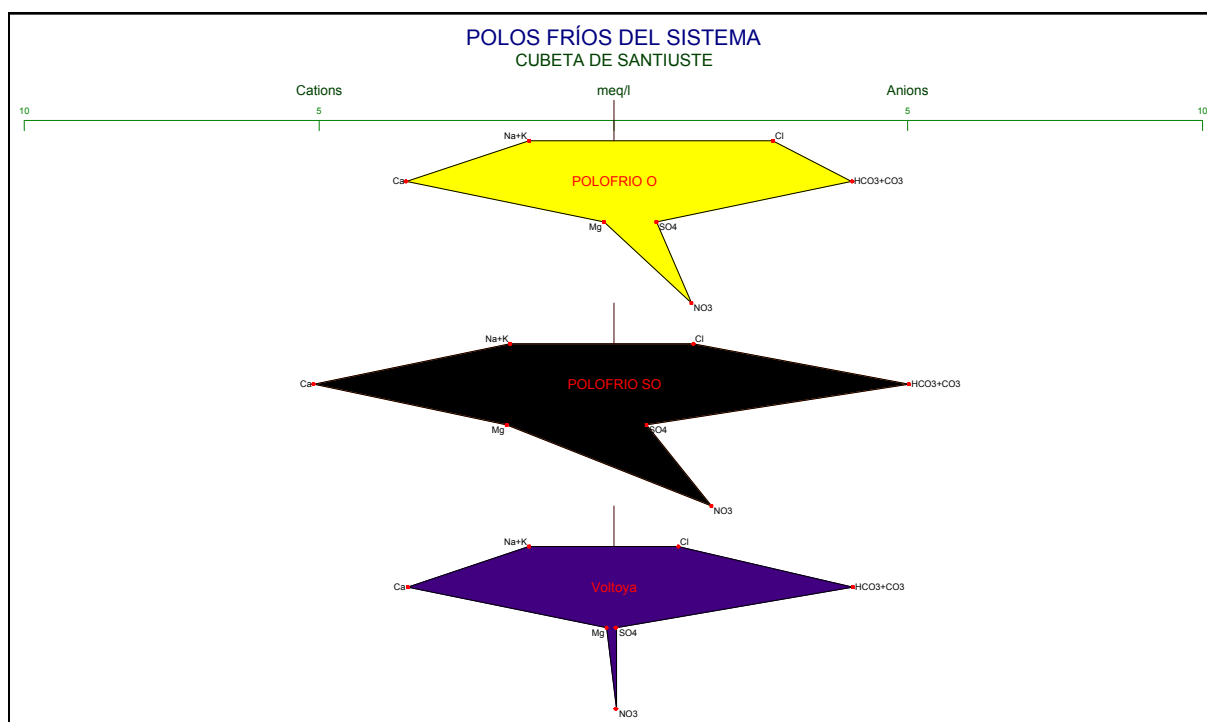
Los hidrogramas elegidos han sido el de Stiff y Piper-Hill-Langelier, cuyo funcionamiento ha sido explicado en el Apto. 4.4 y cuya representación es la siguiente (Figs. 3.12 y 3.13 a y b).



Fig. 3.12. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier con representación de los polos fríos del sistema.

En esta etapa de caracterización y dada la disponibilidad de datos, no resulta aplicable la elaboración de cartografías de isocontenidos e isorrelaciones.





Figs. 3.13 a) y b). Hidrograma de Stiff con representación de los polos fríos del sistema.

– Caracterización del *polo frío* medio

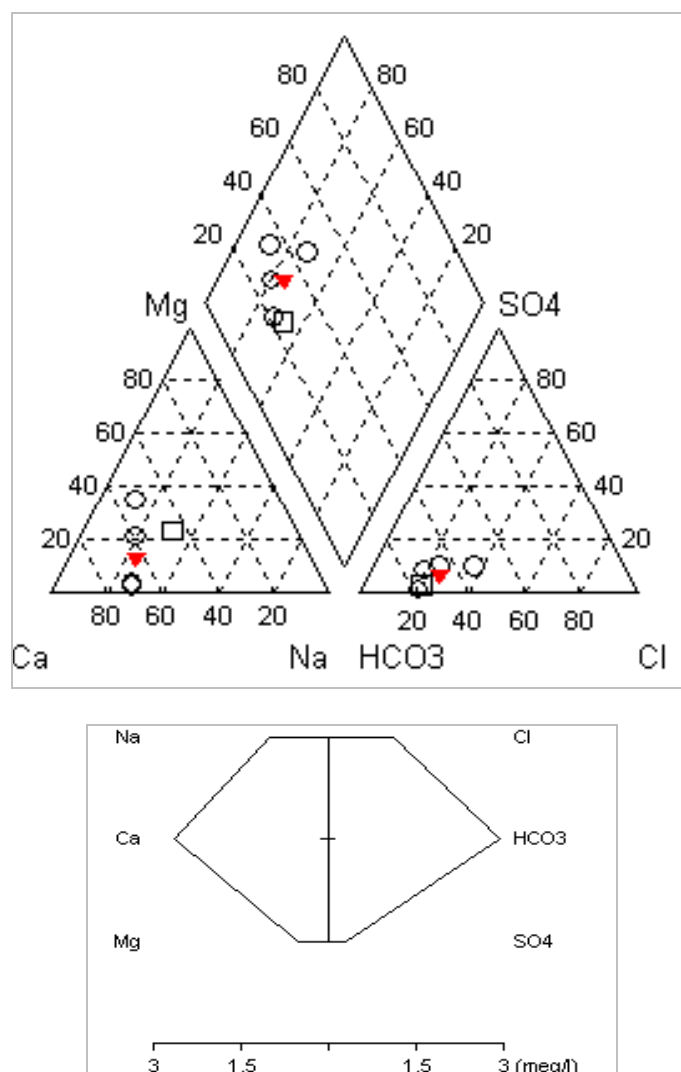
Como técnica adicional y dado el carácter de “*polo frío*” de las cinco muestras presentadas, se ha calculado la composición supuesta de un agua hipotética resultante del proceso de mezcla de estas aguas. Esta muestra será indicativa del tipo de agua existente en la Cubeta de Santiuste antes de comenzar los procesos de interacción con el suelo. Su composición química es la especificada como valor medio en el cálculo estadístico.

- Na^+ 23.066
- K^+ 2.118
- Ca^{++} 52.67
- Mg^{++} 6.47
- Cl^- 40.192
- SO_4^- 13.788
- HCO_3^- 178.838

Se trata de un agua bicarbonatada y clorurada calco-sódica, bien compensada iónicamente, de salinidad media ($C=495 \mu\text{S}/\text{cm}$), y abundancia de sodio y cloruros en disolución con respecto al estándar de calidad para aguas potables.

Su representación en los hidrogramas seleccionados se presenta a continuación (Figs. 3.14 y 3.15) junto con las restantes muestras.

Los minerales presentes en el agua originaria en disolución son la halita, silvita, calcita, dolomita y anhidrita, con cuarzo/feldespato en menor cuantía.



Figs. 3.14 y 3.15. Hidrogramas de Piper-Hill-Langelier y Stiff, respectivamente, para el polo frío medio.

5.3.2. Red de control de la hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)

Con cada grupo de muestras se va a realizar una caracterización similar a la ya realizada.

El análisis estadístico de los datos se considera un procedimiento indispensable para la correcta caracterización de las aguas de los distintos niveles acuíferos de la zona de estudio y su interpretación hidrogeológica.

Una vez obtenidos los resultados del análisis de alícuotas, tanto *in situ* como en laboratorio, se ha procedido a su análisis estadístico como etapa previa a su caracterización.

Los resultados de dicho análisis se presentan tabulados en el Anexo 3.1.2.3, *red de control de la hidroquímica, fase preoperacional (RCH-1999), caracterización*.

Los parámetros corresponden, respectivamente y por columnas, a:



Para la tabla de inventario y parámetros inestables:

- Nombre del punto de agua.
- Coordenadas UTM.
- Naturaleza de la captación.
- Nivel del agua con respecto a la superficie y cota absoluta.
- Fecha de inventario del punto de agua y medida del nivel freático.
- Uso del agua.
- Litología del acuífero.
- Parámetros inestables medidos en campo (subíndice c), correspondientes a conductividad en $\mu\text{S/cm}$, pH, temperatura del agua y del aire en el momento del muestreo, fecha de determinación, concentración en oxígeno disuelto, y parámetros medidos en laboratorio (subíndice l), pH y conductividad. Este formato es el adoptado para todas las tablas del Anexo 3.1.2, que además cuentan con su leyenda correspondiente a pie de página.

Para la tabla de análisis en laboratorio:

- Iones mayoritarios en mg/l (sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y nitratos).
- Facies hidroquímica calculada.

Con objeto de verificar la veracidad de los resultados, se ha comprobado la calidad analítica mediante el cálculo del balance iónico y del valor de las “residuales” para la conductividad.

• Cálculo del balance iónico

En un análisis completo la suma de miliequivalentes de los aniones ha de ser igual a la suma de miliequivalentes de los cationes. De haber diferencias importantes entre el sumatorio de los aniones y cationes, se deduce que hay un error analítico importante o bien hay abundancia de algún elemento menor o traza no determinado en el análisis.

El balance de los principales macroconstituyentes de las aguas naturales sería:

$$r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) = r(\text{CO}_3\text{H}^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-) \quad (r=\text{meq/l})$$

En la tabla del Anexo 3.1.2.3, *caracterización*, aparece un listado con las muestras analizadas y los balances iónicos obtenidos. De su análisis se desprende que la analítica parece apropiada. Los porcentajes mayores se encuentran en sondeos intermedios o profundos, lo que induce a pensar que más bien se trate de la presencia de iones o trazas no determinadas que de errores en la analítica. Este desequilibrio puede ser debido a que las aguas se encuentren mal compensadas iónicamente.



El balance de cargas analítico respecto al obtenido en el cálculo de especiación de los elementos en solución excede en dos casos (muestras de RCH 3 y 6) el $\pm 12\%$, valor que delimita la incertidumbre (*Nordstrom et al, 1990*). Los resultados obtenidos muestran un porcentaje de muestras superior al 96% cuyo error de balance no superaba el límite establecido por *Nordstrom & Ball, (1989)*.

El valor de las “residuales” para la conductividad queda dentro del rango de aceptabilidad.

Este análisis se ha realizado conforme a la metodología descrita en el apartado de materiales y métodos, de acuerdo con el plan de trabajo presentado al comienzo del apartado para conseguir una adecuada caracterización de las aguas, excepto para algunos constituyentes como el oxígeno disuelto y ácido sulfhídrico, en los que se ha considerado más interesante comentar los resultados conjuntamente.

• Clasificaciones de aguas

En cuanto a las facies, la dominante es la bicarbonatada-cálcico-magnésica o magnésico-cálcicas con 13 muestras, luego las bicarbonatadas magnésicas con 2 muestras, una bicarbonatada cálcica, un ejemplar único de facies bicarbonatada calco-sódica, otra facies bicarbonatada y clorurada magnésica y otra sulfatado-magnésica.

Se han calculado las facies hidroquímicas en base a los iones que sobrepasan el 20% (aniones y cationes) del porcentaje iónico. Son:

- Mg-Ca-Na-HCO₃
- Na-HCO₃
- Mg-Ca-SO₄-NO₃-H
- Mg-Ca-HCO₃-SO₄
- Na-Ca-HCO₃
- Na-HCO₃
- Na-HCO₃
- Mg-Ca-Na-HCO₃-S
- Mg-Ca-HCO₃-SO₄
- Mg-Ca-Na-HCO₃-S
- Mg-Ca-Na-HCO₃-N
- Mg-Ca-HCO₃-Cl-N
- Na-HCO₃
- Mg-Na-Ca-HCO₃-C
- Mg-Ca-Na-HCO₃-C
- Mg-Ca-Na-HCO₃-N
- Ca-Mg-Na-HCO₃-N
- Ca-Mg-Na-HCO₃-N
- Ca-Na-Mg-HCO₃
- Ca-Mg-Na-HCO₃-N
- Mg-Ca-Na-HCO₃-N
- Mg-Ca-HCO₃
- Ca-Mg-NO₃-HCO₃
- Mg-Ca-HCO₃-Cl-N
- Mg-Ca-Na-HCO₃-C
- Na-Mg-HCO₃
- Ca-Mg-HCO₃-NO₃
- Ca-Mg-Na-HCO₃

NOTA: Las facies empleadas en el análisis de datos fue realizada para valores que sobrepasan el 50 %.



La representación en un hidrograma de *Piper-Hill-Langelier* de todas las muestras confirma la existencia de varias familias de muestras. La división se ha realizado en base a la profundidad de las captaciones de acuerdo con la caracterización del acuífero.

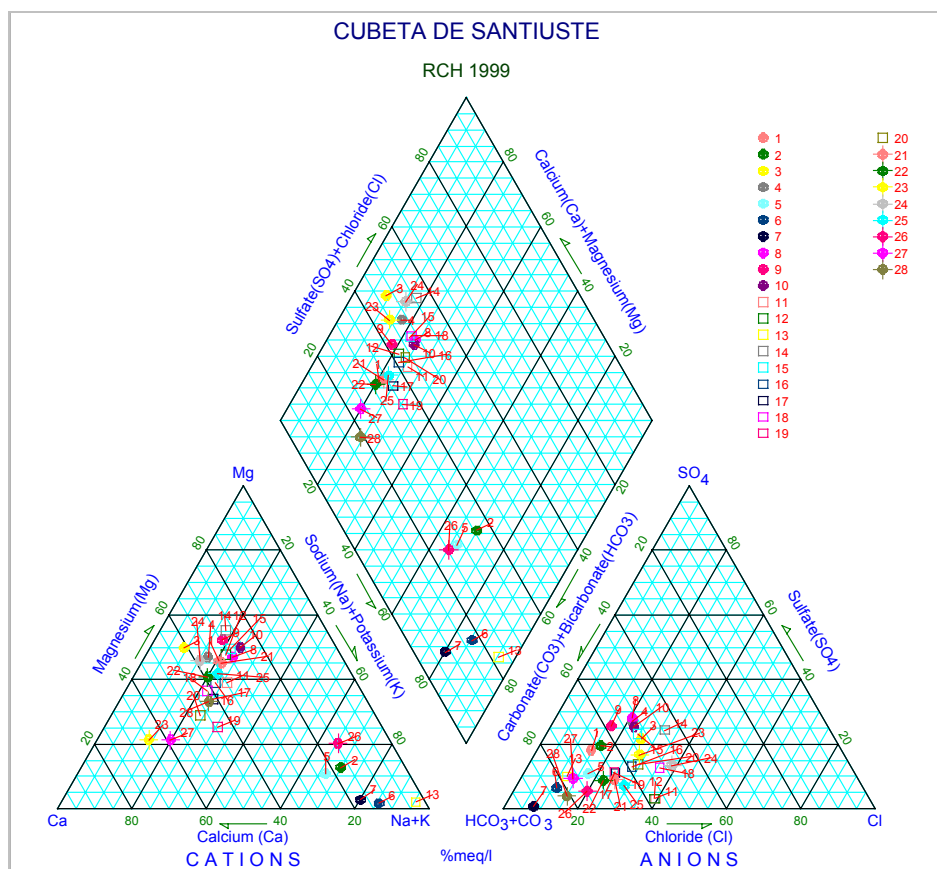


Fig. 3.16. Representación en un diagrama de Piper de todas las muestras de la RCH 99.

5.3.2.1. Pozos, pozos-sondeo, minisondeos y sondeos de profundidad inferior a 75 m

• Análisis estadístico multivariante

Como punto de partida para el análisis estadístico multivariable, se han realizado agrupamientos por las similitudes físico-químicas de las muestras y discriminado aquellas con valores extremos, atendiendo a su ambiente hidrogeológico.

Los puntos seleccionados, de acuerdo con la numeración de la red de control de la hidroquímica (RCH), corresponde a los puntos: 1, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27 y 28. Esta numeración será la empleada de ahora en adelante.

La **temperatura** proporciona una valiosa información acerca de la procedencia del agua, así como de su evolución (*Dim et al, 2002*). Los rangos térmicos observados en las muestras de este grupo oscilan entre 14° C para el punto 14 y 23°C en el 16. La Tª media es de 17.6° C (determinaciones para el verano de 1.999) que pueden resultar

ligeramente sobrevaloradas en estas captaciones más someras y en las de profundidad intermedia.

Los valores de la **conductividad medida *in situ*** varía entre 300 $\mu\text{S/cm}$ del punto n.º 27 y 1870 $\mu\text{S/cm}$ del punto n.º 10. La conductividad media es de 949,4 $\mu\text{S/cm}$.

La **conductividad** obtenida en el análisis de **laboratorio** oscila entre los valores de 506 (punto n.º 23) y 2.040 $\mu\text{S/cm}$ (punto 10 –el mismo que *in situ*–). La media de los valores cuantificados en el laboratorio es de 1125,8 $\mu\text{S/cm}$, ligeramente superior a la obtenida en campo.

En cuanto a la determinación del **pH *in situ***, el rango oscila entre los valores de 8 para los puntos n.º 9 y 27 y 9,6 para el punto n.º 11, lo que corresponde a unas facies ligeramente básicas a muy básicas. La media de las determinaciones en campo es de 8,5.

El **pH** obtenido en el **laboratorio** oscila entre los valores de 7.2 para el punto n.º 27 y 8.0 en los puntos n.º 25 y 17. La media de los valores cuantificados es de 7.6, valor inferior al obtenido en campo.

Del análisis químico de macroconstituyentes se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 3.11):

mg/l⇒	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃
min⇒ (n.º pto.)	13 (3)	0.5 (8)	53 (3)	14 (23)	23 (27)	14 (28)	0 –	87 (23)	30.8 (28)
Max⇒ (n.º pto.)	112 (10)	12 (21)	124 (17)	129 (10)	145 (10)	222 (10)	0 –	580 (10)	283 (21)
media	59.3	3.5	87.9	63.3	84.6	74.2	0	341	148.6

Tabla 3.11. Análisis estadístico de los resultados analíticos de los puntos de agua de la RCH99 (preoperacional) de profundidad inferior a 75 m.

Los valores de **sodio** son característicos de aguas poco sodificadas y aptas para el regadío. Una excepción la constituye el punto 10, en las afueras de Ciruelos de Coca, asociado a un sistema fluvial superficial y a una laguna salina desecada, de ahí su alta salinidad y las elevadas concentraciones de magnesio, potasio, cloruros, bicarbonatos y sulfatos que presenta.

Los valores de **potasio** son característicos de la litología asociada a las captaciones más superficiales, excepto para los puntos 10 y 21. El primero por las razones mencionadas, el segundo es un pozo somero que parece estar asociado al drenaje más superficial de tierras de labor intensamente abonadas, con presencia de granjas porcinas a poca distancia. Este punto presenta el máximo valor de nitratos y una elevada conductividad (1.269 $\mu\text{S/cm}$).

El contenido en **calcio y magnesio** es característico de arenas silíceas.

Los **sulfatos** aparecen con mayor abundancia en el Sector Norte del área de estudio, excepto en el punto 10, con valores altamente salinos.

No se han detectado **carbonatos** en las captaciones de esta profundidad.

En cuanto a los **nitratos** hay una concentración máxima entre Ciruelos y Coca, así como en las inmediaciones de la cacería de Santiuste de San Juan Bautista.

La variación espacial de todos estos iones resulta fácilmente accesible a partir de la observación de los mapas de isolíneas o isocoras² en el caso de líneas que unen puntos de igual concentración en dicha sustancia). Estos mapas se presentan en el Anexo 3.1.2.4, “*Cartografía temática. Mapas de isocontenidos*” para el acuífero superficial.

De acuerdo con su quimismo, estas facies pueden ser agrupadas en una “familia” cuya principal característica es ser aguas jóvenes asociadas a un acuífero superficial de tiempos de residencia en el acuífero relativamente cortos. Esta similitud se hace patente a partir de la observación de un diagrama de *Piper-Hill-Langelier* (Fig. 3.17).

Los puntos más representativos por presentar una analítica cercana al promedio de todos los análisis son, según la designación de la RCH, el 9, 15 y 16, ubicados en la zona central de la cubeta de acuerdo con perfiles de orientación este-oeste.

Las **matrices de correlación** muestran la desviación de cada ión con respecto a la curva interpolada. Se han calculado 4 matrices: una para la totalidad de los puntos de la red, la segunda para las captaciones más superficiales (hasta 75 m), la tercera para las designadas “intermedias” de profundidad comprendida entre 75 y 150 m y la última para los sondeos “profundos” (más de 150 m).

Por último se ha realizado un tratamiento estadístico de las muestras de agua.

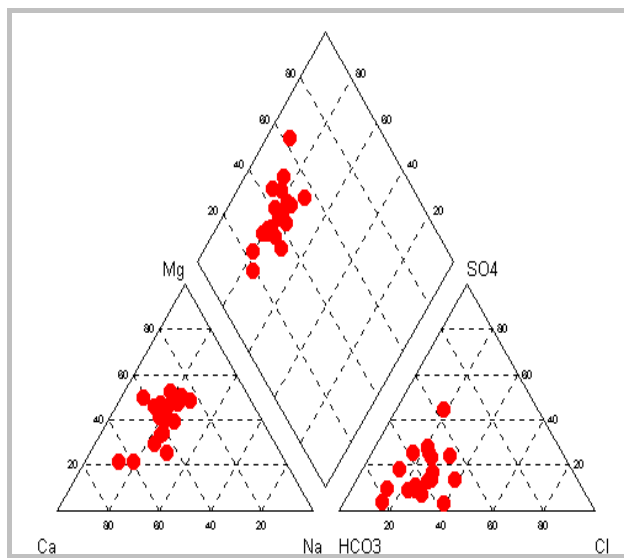


Fig. 3.17. Representación en un diagrama de Piper de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad inferior a 75 m.

² Por definición, líneas que unen puntos de igual concentración de “elementos funcionales”.

• Análisis hidrogeostadístico de las muestras

El análisis estadístico se ha realizado cuatro veces. Una para la totalidad de las muestras analizadas, y las tres restantes para los grupos ya definidos en el párrafo anterior.

El análisis de las muestras analizadas (considerando las concentraciones en mg/l) arroja los siguientes resultados (Tablas 3.12 a 3.15):

- Tratamiento estadístico en los sondeos superficiales: <75 m

	Mín	Máx	Media	Desv.St.	Desv.Tip.	Coef.Var (%)
pH	7.2	8.0	7.552	7.831	103.697	10.0
Cond	506.0	2040.0	1158.722	351.546	30.339	75.0
Na	13.0	112.0	61.526	28.149	45.751	88.0
K	0.5	12.0	3.379	3.358	99.375	96.0
Ca	53.0	124.0	88.632	19.526	22.03	57.0
Mg	14.0	129.0	64.211	28.423	44.265	89.0
Cl	23.0	153.0	84.368	39.83	47.21	85.0
SO4	14.0	222.0	82.632	61.289	74.172	94.0
HCO3	87.0	580.0	341.053	104.224	30.56	85.0
NO3	30.8	283.0	152.095	65.68	43.184	89.0

Tabla 3.12. Captaciones de profundidad inferior a 75 m. Fase preoperacional. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3	CO3
pH	1.0	0.357	0.463	0.4	0.435	0.352	0.377	-2.1E-2	0.49	0.11	0.0
Cond		1.0	0.904	0.348	0.6	0.923	0.816	0.738	0.841	0.387	0.0
Na			1.0	0.313	0.691	0.756	0.783	0.411	0.831	0.303	0.0
K				1.0	0.454	0.333	0.247	-1.6E-2	0.467	0.127	0.0
Ca					1.0	0.408	0.553	6.6E-3	0.611	0.464	0.0
Mg						1.0	0.762	0.736	0.76	0.288	0.0
Cl							1.0	0.368	0.607	0.39	0.0
SO4								1.0	0.376	2.8E-2	0.0
HCO3									1.0	3.3E-3	0.0
NO3										1.0	0.0
CO3											1.0

Punto de corte con el eje Y:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3	CO3
pH	0.0	-2.8E+3	-355.64	-39.57	-183.32	-256.23	-395.83	123.95	-1.3E+3	-78.94	-78.94
Cond		0.0	-14.2	-0.396	54.94	-21.31	-20.06	-69.85	86.63	65.05	65.05
Na			0.0	1.08	59.14	17.24	16.22	27.58	151.85	108.56	108.56
K				0.0	79.72	54.69	74.47	83.64	292.06	143.67	143.67
Ca					0.0	11.59	-15.61	80.79	51.99	13.73	13.73
Mg						0.0	15.84	-19.34	162.02	109.33	109.33
Cl							0.0	34.92	207.13	97.88	97.88
SO4								0.0	288.16	149.59	149.59
HCO3									0.0	151.39	151.39
NO3										0.0	151.39
CO3											0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3	CO3
pH	1.0	515.61	54.81	5.64	35.73	42.1	63.1	-5.43	214.84	30.36	30.36
Cond		1.0	6.8E-2	3.4E-3	3.1E-2	7.5E-2	9.2E-2	0.129	0.229	7.4E-2	7.4E-2
Na			1.0	3.7E-2	0.479	0.763	1.11	0.895	3.08	0.708	0.708
K				1.0	2.64	2.82	2.93	-0.298	14.5	2.49	2.49
Ca					1.0	0.594	1.13	2.1E-2	3.26	1.56	1.56
Mg						1.0	1.07	1.59	2.79	0.666	0.666
Cl							1.0	0.566	1.59	0.643	0.643
SO4								1.0	0.64	3.0E-2	3.0E-2
HCO3									1.0	2.1E-3	2.1E-3
NO3										1.0	2.1E-3
CO3											1.0

Tablas 3.13. a 3.15. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

Las concentraciones en meq/l se presenta en las Tablas 3.16 a 3.19:

(%)	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Tip.	Coef. Var
pH	7.2	8.0	7.552	7.831	103.697	10.0
Cond	506.0	2040.0	1158.722	351.546	30.339	75.0
Na	0.565	4.872	2.676	1.224	45.751	88.0
K	0.013	0.307	0.086	0.086	99.375	96.0
Ca	2.645	6.188	4.423	0.974	22.03	57.0
Mg	1.152	10.613	5.283	2.338	44.265	89.0
Cl	0.649	4.316	2.38	1.123	47.21	85.0
SO4	0.291	4.622	1.72	1.276	74.172	94.0
HCO3	1.426	9.507	5.59	1.708	30.56	85.0
NO3	0.497	4.564	2.453	1.059	43.184	89.0

Tabla 3.16. Captaciones de profundidad inferior a 75 m. Fase preoperacional. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	0.357	0.463	0.4	0.435	0.352	0.377	-2.1E-2	0.49	0.11
Cond		1.0	0.904	0.348	0.6	0.923	0.816	0.738	0.841	0.387
Na			1.0	0.313	0.691	0.756	0.783	0.411	0.831	0.303
K				1.0	0.454	0.333	0.247	-1.6E-2	0.467	0.127
Ca					1.0	0.408	0.553	6.6E-3	0.611	0.464
Mg						1.0	0.762	0.736	0.76	0.288
Cl							1.0	0.368	0.607	0.39
SO4								1.0	0.376	2.8E-2
HCO3									1.0	3.3E-3
NO3										1.0

Punto de corte con el eje Y:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	0.0	-2.8E+3	-15.47	-1.01	-9.15	-21.08	-11.17	2.58	-21.21	-1.27
Cond		0.0	-0.617	-1.0E-2	2.74	-1.75	-0.566	-1.45	1.42	1.05
Na			0.0	2.8E-2	2.95	1.42	0.458	0.574	2.49	1.75
K				0.0	3.98	4.5	2.1	1.74	4.79	2.32
Ca					0.0	0.953	-0.44	1.68	0.852	0.221
Mg						0.0	0.447	-0.403	2.66	1.76
Cl							0.0	0.727	3.4	1.58
SO4								0.0	4.72	2.41
HCO3									0.0	2.44
NO3										0.0



Pendiente de la recta de regresión:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	515.61	2.38	0.144	1.78	3.46	1.78	-0.113	3.52	0.49
Cond		1.0	2.9E-3	8.6E-5	1.5E-3	6.2E-3	2.6E-3	2.7E-3	3.8E-3	1.2E-3
Na			1.0	2.2E-2	0.55	1.44	0.718	0.428	1.16	0.262
K				1.0	5.15	9.06	3.23	-0.242	9.29	1.57
Ca					1.0	0.979	0.638	8.7E-3	1.07	0.505
Mg						1.0	0.366	0.402	0.556	0.131
Cl							1.0	0.417	0.922	0.367
SO4								1.0	0.504	2.3E-2
HCO3									1.0	2.0E-3
NO3										1.0

Tabla 3.17. a 3.19. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.

En el caso que nos ocupa, la elaboración de matrices con datos de distintos períodos de captaciones situadas en las inmediaciones del caz, permite obtener conclusiones acerca de la incidencia de la AR en el sistema.

Las únicas captaciones situadas cerca del caz con datos de las fases preoperacional y operacional son el RCH-24, distante 177 m del caz de recarga; RCH-18 (=RCP-27) y RCH-7, correspondientes a sondeos profundos distantes 623 y 560 m del caz respectivamente. Por último el RCH-16 (=RCP-26), distante 355 m del caz.

El hecho de pretender llevar a cabo análisis comparativos ente los análisis de los mismos puntos conlleva la necesidad de aplicar técnicas específicas, como son las matrices de correlación, hidrogramas y simulaciones. Para ello se han calculado las matrices de correlación de las captaciones seleccionadas (Tablas 3.20 a 3.23):

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var (%)
pH	7.3	7.9	7.57	7.788	102.89	8.0
Cond	540.0	1469.0	1101.25	409.375	37.174	63.0
Na	40.0	97.0	72.75	23.908	32.863	59.0
Cond	540.0	1469.0	1101.25	409.375	37.174	63.0
Ca	19.0	127.0	89.5	49.373	55.165	85.0
Mg	1.9	75.0	52.725	34.102	64.68	97.0
Cl	16.0	136.0	97.0	55.684	57.406	88.0
SO4	2.0	66.0	48.75	31.213	64.027	97.0
HCO3	279.0	380.0	330.25	41.636	12.608	27.0
NO3	2.4	284.0	170.6	123.416	72.342	99.0

Tabla 3.20. Captaciones de profundidad inferior a 75 m adyacentes al caz de AR. Fase preoperacional. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	0.374	0.676	0.368	0.328	0.165	-9.3E-2	0.121	0.995	0.375
Cond		1.0	-0.355	-0.444	0.993	0.925	0.884	0.931	0.378	1.0
Na			1.0	0.891	-0.43	-0.608	-0.744	-0.635	0.635	-0.347
K				1.0	-0.544	-0.746	-0.72	-0.74	0.295	-0.431
Ca					1.0	0.964	0.91	0.966	0.344	0.991
Mg						1.0	0.938	0.997	0.203	0.919
Cl							1.0	0.961	-7.7E-2	0.882
SO4								1.0	0.153	0.926
HCO3									1.0	0.378
NO3										1.0



Punto de corte con el eje Y:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	0.0	-3.6E+3	-420.33	-22.59	-404.6	-119.19	255.6	-66.13	-933.47	-1.2E+3
Cond		0.0	95.57	9.01	-42.34	-32.16	-35.49	-29.41	287.88	-161.35
Na			0.0	-0.922	154.14	115.8	223.05	109.09	249.76	301.09
K				0.0	152.6	112.52	191.18	103.04	301.43	295.59
Ca					0.0	-6.86	5.19	-5.89	304.3	-51.0
Mg						0.0	16.27	0.626	317.19	-4.79
Cl							0.0	-3.48	335.84	-19.02
SO4								0.0	320.29	-7.83
HCO3									0.0	-199.48
NO3										0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	612.13	64.67	3.75	64.8	22.55	-20.8	15.07	165.73	185.28
Cond		1.0	-2.1E-2	-2.8E-3	0.12	7.7E-2	0.12	7.1E-2	3.8E-2	0.301
Na			1.0	9.5E-2	-0.888	-0.867	-1.73	-0.829	1.11	-1.79
K				1.0	-10.56	-10.01	-15.76	-9.09	4.82	-20.92
Ca					1.0	0.666	1.03	0.61	0.29	2.48
Mg						1.0	1.53	0.913	0.248	3.33
Cl							1.0	0.538	-5.8E-2	1.95
SO4								1.0	0.204	3.66
HCO3									1.0	1.12
NO3										1.0

Tabla 3.21. a 3.23. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

Las concentraciones en meq/l se presenta en las Tablas 3.24 a 3.27:

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef.Var (%)
pH	7.3	7.9	7.57	7.788	102.89	8.0
Cond	540.0	1469.0	1101.25	409.375	37.174	63.0
Na	1.74	4.219	3.164	1.04	32.863	59.0
Cond	540.0	1469.0	1101.25	409.375	37.174	63.0
Ca	0.948	6.337	4.466	2.464	55.165	85.0
Mg	0.156	6.17	4.338	2.806	64.68	97.0
Cl	0.451	3.836	2.736	1.571	57.406	88.0
SO4	0.042	1.374	1.015	0.65	64.027	97.0
HCO3	4.573	6.229	5.413	0.682	12.608	27.0
NO3	0.039	4.58	2.751	1.99	72.342	99.0

Tabla 3.24. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	0.374	0.676	0.368	0.328	0.165	-9.3E-2	0.121	0.995	0.375
Cond		1.0	-0.355	-0.444	0.993	0.925	0.884	0.931	0.378	1.0
Na			1.0	0.891	-0.43	-0.608	-0.744	-0.635	0.635	-0.347
K				1.0	-0.544	-0.746	-0.72	-0.74	0.295	-0.431
Ca					1.0	0.964	0.91	0.966	0.344	0.991
Mg						1.0	0.938	0.997	0.203	0.919
Cl							1.0	0.961	-7.7E-2	0.882
SO4								1.0	0.153	0.926
HCO3									1.0	0.378
NO3										1.0

Punto de corte con el eje Y:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	0.0	-3.6E+3	-18.28	-0.578	-20.19	-9.81	7.21	-1.38	-15.3	-20.03
Cond		0.0	4.16	0.231	-2.11	-2.65	-1.0	-0.612	4.72	-2.6



Na	0.0	-2.4E-2	7.69	9.53	6.29	2.27	4.09	4.86
K		0.0	7.61	9.26	5.39	2.15	4.94	4.77
Ca			0.0	-0.564	0.146	-0.123	4.99	-0.822
Mg				0.0	0.459	1.3E-2	5.2	-7.7E-2
Cl					0.0	-7.3E-2	5.5	-0.307
SO4						0.0	5.25	-0.126
HCO3							0.0	-3.22
NO3								0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	612.13	2.81	9.6E-2	3.23	1.85	-0.587	0.314	2.72	2.99
Cond		1.0	-9.0E-4	-7.1E-5	6.0E-3	6.3E-3	3.4E-3	1.5E-3	6.3E-4	4.9E-3
Na			1.0	5.6E-2	-1.02	-1.64	-1.12	-0.397	0.417	-0.665
K				1.0	-20.6	-32.19	-17.38	-7.4	3.09	-13.19
Ca					1.0	1.1	0.58	0.255	9.5E-2	0.8
Mg						1.0	0.525	0.231	4.9E-2	0.652
Cl							1.0	0.397	-3.3E-2	1.12
SO4								1.0	0.161	2.83
HCO3									1.0	1.1
NO3										1.0

Tabla 3.25. a 3.27. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.

La correlación resultante es positiva y consistente, por tanto previsiblemente las variables son estocásticas, regionalizadas y presentan un grado de interdependencia.

La elaboración de hidrogramas de *Scatter* permitirá confirmar esta primera interpretación.

• Índices hidrogeoquímicos y relaciones iónicas

La mayoría de las aguas de captaciones someras en la zona de estudio presentan facies bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas. A medida que circulan por el acuífero, y en virtud del proceso de cambio de bases, el agua cede calcio a las arcillas y recoge sodio por intercambio catiónico, evolucionando hacia facies bicarbonatadas sódicas, sobre todo en acuíferos regionales con flujos profundos. La presencia de niveles puntuales de evaporitas o cualquier otra litología, inducen unas características particulares a las aguas.

La principal herramienta para estudiar la evolución de la composición química del agua subterránea con la circulación regional y su tiempo de residencia en el acuífero son los índices y diagramas hidrogeoquímicos.

Las relaciones entre los iones disueltos en un agua se pueden utilizar para deducir la evolución de la composición química del agua subterránea, la actuación de fenómenos modificadores concretos, el origen de alguna característica especial de dicho agua, detectar mezclas de agua, estudiar la circulación regional y el tiempo de residencia del agua en el acuífero, el grado de salinización alcanzado, etc.

Para determinar la circulación de las aguas en el acuífero y su evolución se van a emplear una serie de relaciones o índices hidrogeoquímicos seleccionados entre todos los existentes.



El *modus operandi* va a ser doble: por un lado se va a intentar estudiar la evolución “en absoluto”, es decir, la evolución espacial de los valores a partir de la ordenación de ciertas isorrelaciones iónicas y la elaboración de mapas temáticos para las isorrelaciones más comunes. Más tarde se estudiará el método “en relativo”, es decir, estudiando la evolución de ciertos iones con respecto a la evolución de la conductividad de las muestras, mediante el empleo de diagramas hidrogeoquímicos de *Scatter*. Ambos tipos de metodologías se presentan más adelante.

Para la exposición de los datos se ha generado la tabla del Anexo 3.1.2, *red de control de la hidroquímica, fase preoperacional (RCH-1999)*, en la que aparecen listados los parámetros:

- Conductividad (determinada en laboratorio).
- Concentración en miliequivalentes de los principales iones macroconstituyentes.
- Relaciones iónicas (índices hidrogeoquímicos) en miliequivalentes por litro:
 - Relación magnesio/calcio
 - Relación potasio/sodio
- Relación cloruro/bicarbonato.
- Relación sulfato/cloruro.
- Relación sodio/calcio.
- Relación sodio/cloruro.
- Relación calcio/sulfato.
- Relación calcio/magnesio.
- Relación sodio/(calcio+magnesio)
- Relación sulfato/calcio.
- Relación cuadrática del calcio/bicarbonato.
- Índices iónicos:
 - Índice catiónico.
 - Índice aniónico.
 - Índice de cambio de bases.

Algunos de los índices de utilidad más comprobada han sido empleados con objeto de determinar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero mediante técnicas geoquímicas.

- Relación iónica magnesio/calcio (rMg^{2+}/rCa^{2+})

De acuerdo con esta relación, las muestras analizadas pueden ser ordenadas, de menor a mayor, por orden de “tiempo de residencia en el acuífero.” Este ordenamiento aparece reflejado en la tabla adjunta n.º 3.28. En la cartografía “*Mapa de isorrelaciones iónicas magnesio/calcio*” del Anexo 3.1.2.4 se muestra la distribución de esta relación para la totalidad de los puntos muestreados.

Los resultados obtenidos de la aplicación de esta relación no son satisfactorios dada la heterogeneidad litológica de las muestras. Las muestras que presentan relaciones

mínimas son aquellas que tienen en disolución calcita o aragonito, que generalmente corresponden con sondeos intermedios o profundos. La presencia de concentraciones importantes de dolomita en las captaciones superficiales ha influido en la “inversión” de esta herramienta, atribuyendo un mayor período de residencia en el acuífero a las aguas de captaciones someras que a las profundas. Los valores máximos son para aquellas captaciones que registran sobresaturación en dolomita (15, 9, 10, 14), que en todos los casos son pozos o minisondeos someros. Esta presencia de magnesio podría estar vinculada a un origen contaminante.

Excluyendo los valores de sondeos profundos y puntos contaminados, se puede apreciar en zonas puntuales que la relación aumenta desde pozos más someros (n.º 15 y 16) bilateralmente hacia captaciones algo más profundas, por lo que la relación si parece apropiada para la caracterización del agua de las captaciones que interceptan agua del acuífero cuaternario, en cuyo caso aumenta ligeramente con la profundidad.

- Relación iónica potasio/sodio (rK^+/rNa^+)

Esta relación suele variar entre 0,001 y 1 en las aguas continentales. Su disminución está relacionada con el aumento de la salinidad o con el tiempo de residencia del agua en el acuífero, debido a la fijación preferente del K^+ por las arcillas. En la zona de estudio, esta relación oscila entre 0,0006 en el punto n.º 6 y 0,1 en el punto 21.

De acuerdo con esta relación, las muestras analizadas pueden ser ordenadas, de menor a mayor, por orden de “tiempo de residencia en el acuífero”. Este ordenamiento aparece reflejado en la tabla adjunta. En la cartografía “*Mapa de isorrelaciones iónicas potasio/sodio*” del Anexo 3.1.2.4 se muestra la distribución de esta relación para la totalidad de los puntos muestreados.

Según esta relación, las aguas menos evolucionadas son aquellas subsaturadas en halita, por lo general de sondeos intermedios que atraviesan al acuitardo arcilloso. Están distribuidas en la zona central de la Cubeta de acuerdo con perfil norte-sur (inmediaciones de Villagonzalo de Coca). Las aguas de relación más alta se concentran en torno a la cacera del vertido de aguas residuales de Santiuste y en pozos epidérmicos o minisondeos, por lo que al hecho de que las facies miocenas detríticas presenten valores pobres en sodio hay que añadir un origen antrópico de la presencia de potasio y un grado de incertidumbre del método superior al normal por culpa de la contaminación.

Las oscilaciones espaciales de este valor en los sondeos son atribuibles a procesos de mezclas de aguas.

La correlación entre la conductividad y los cationes $K+Na$ ayuda a posicionar variaciones de salinidad. Para ello se ha elaborado un diagrama hidroquímico de Scatter conductividad-potasio+sodio, que aparece en el apartado siguiente.

- Relación iónica cloruro/bicarbonato (rCl^-/rCO_3H^-)



De acuerdo con esta relación, las muestras analizadas pueden ser ordenadas, de menor a mayor, lo que equivale a un ordenamiento por salinidad creciente (lo que conlleva por lo general un mayor “tiempo de residencia en el acuífero”). Este ordenamiento aparece reflejado en la Tabla 3.28.

Los valores de esta relación oscilan entre 0,13 y 1,27. En la Tabla 1 del Anexo 3.1.2.3 se muestra la distribución de esta relación para todos los puntos muestreados.

En general se aprecia un aumento de la salinidad desde la zona norte hacia el eje de la *Cubeta*, alcanzando valores máximos en las inmediaciones del vertido de aguas residuales de la citada cacería. Se trata de una relación cuyos resultados están de nuevo enmascarados por la presencia de sustancias contaminantes. Esta relación presenta una distribución similar a la del ión Cl.

Aplicando el método de trabajo “en relativo” hay que tener en cuenta que ambos iones presentan tendencia de aumento de concentración con la conductividad. También se puede establecer una correlación con la relación iónica rSO_4/rCl , puesto que también el bicarbonato presenta la misma tendencia de aumento de concentración con la conductividad. En el próximo apartado se presentan los diagramas de Scatter de los tres aniones con respecto a la conductividad.

– Relación iónica sulfato/cloruro (rSO_4/rCl)

Los valores de esta relación oscilan entre 2,91 y 0,06 y la contribución de ambos iones decrece a medida que aumenta la concentración de bicarbonatos y carbonatos. Los valores mayores se sitúan en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, donde asociada a la salinidad de las lagunas desecadas persisten fuertes concentraciones de sulfatos. A medida que aumenta la relación aparecen las aguas del extremo norte como más evolucionadas, de acuerdo con la validez del método. Valores menores se sitúan a medida que se avanza hacia el sur, con altos contenidos en cloruros de origen contaminante. Los valores mínimos están ubicados en los sondeos intermedios y profundos del tercio norte por lo general.

Los puntos de agua de la RCH han sido ordenados de acuerdo con las principales relaciones iónicas y su funcionamiento en la Tabla 3.28, para su estudio “en absoluto.” En ella constan los puntos ordenados de menor a mayor evolución.

Mg/Ca	K/Na	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl
6	6	7	8
7	13	8	9
23	8	13	10
27	11	9	4
5	12	6	1
19	9	27	2
20	5	28	15
2	15	1	13
28	14	10	3
13	2	5	14
17	1	2	27
18	4	26	5

16	26	22	23
22	19	19	6
11	17	17	20
25	16	21	16
24	28	11	19
3	20	4	17
4	27	25	22
21	24	15	21
1	3	16	18
26	22	3	24
12	7	23	26
8	18	20	28
15	10	12	25
9	23	18	11
10	25	14	7
14	21	24	12

Tabla 3.28. Ordenamiento hipotético según el tiempo de residencia en el acuífero de las aguas de las captaciones (de acuerdo con la relación iónica correspondiente).

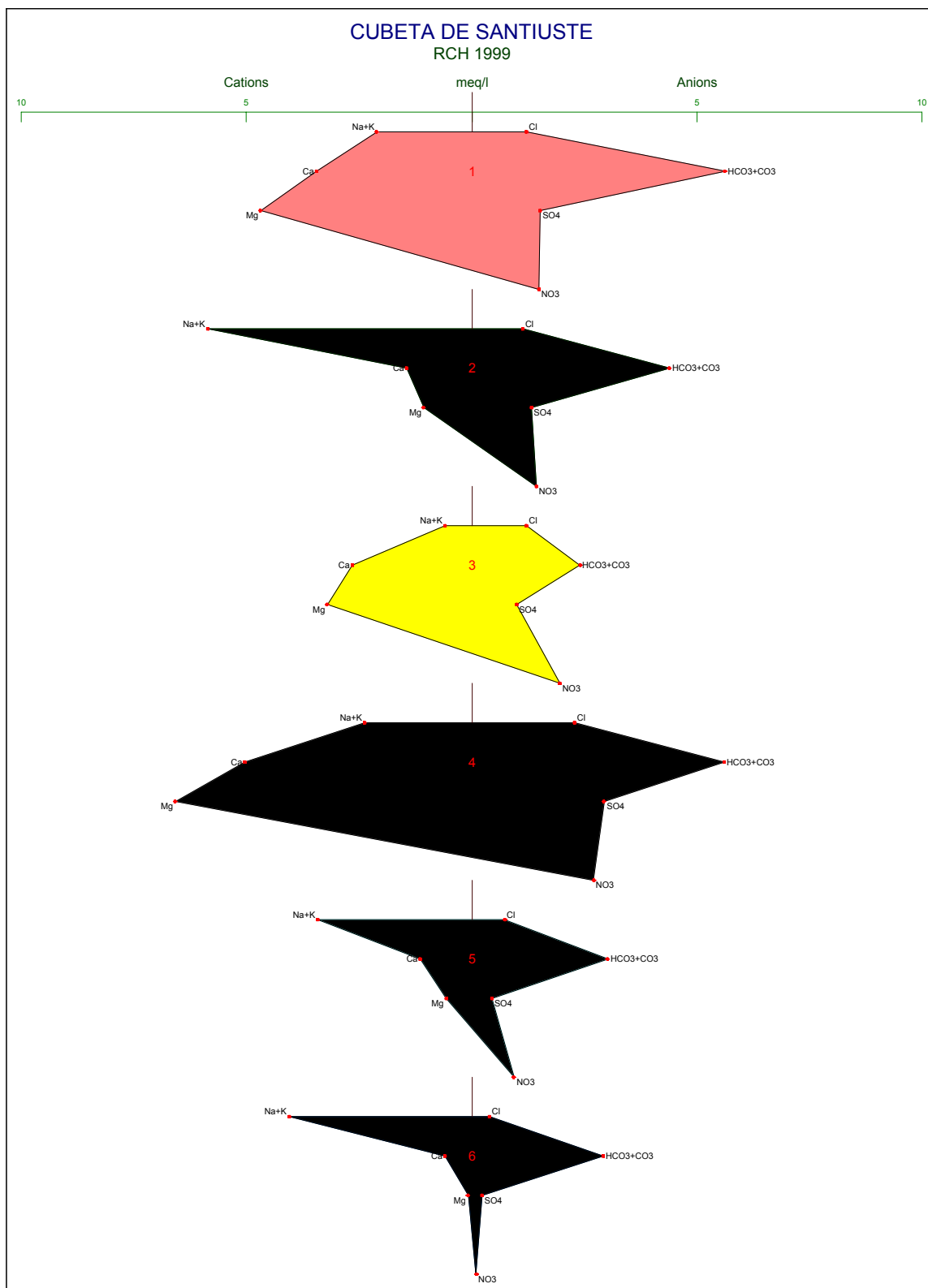
Las restantes relaciones iónicas que aparecen en la Tabla 1 del Anexo 3.1.2.3. Estas relaciones son aplicables para situaciones específicas, y aunque no sean tratadas en detalle, se han adjuntado con objeto de disponer de una caracterización de las aguas lo mayor posible.

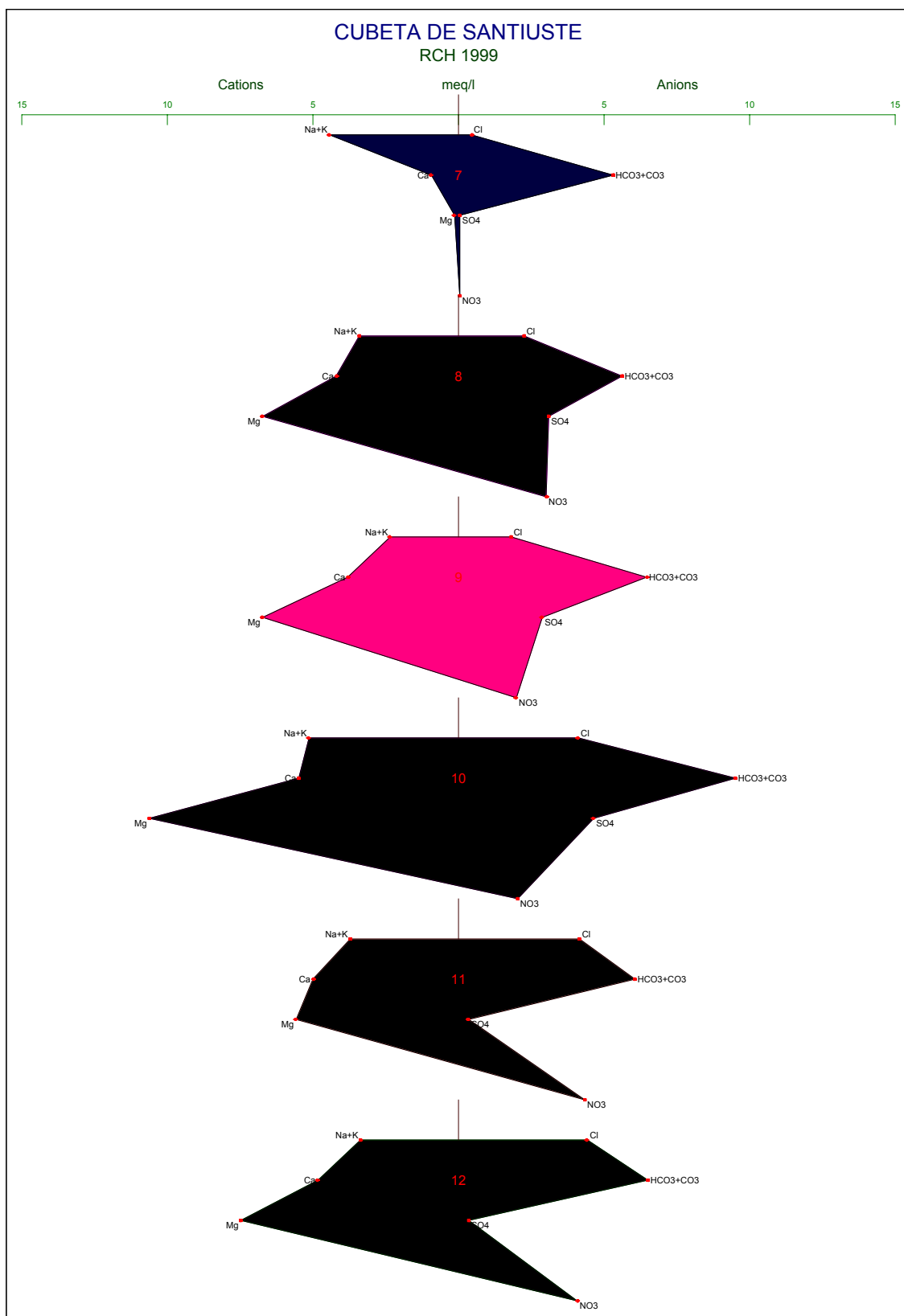
- **Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas**

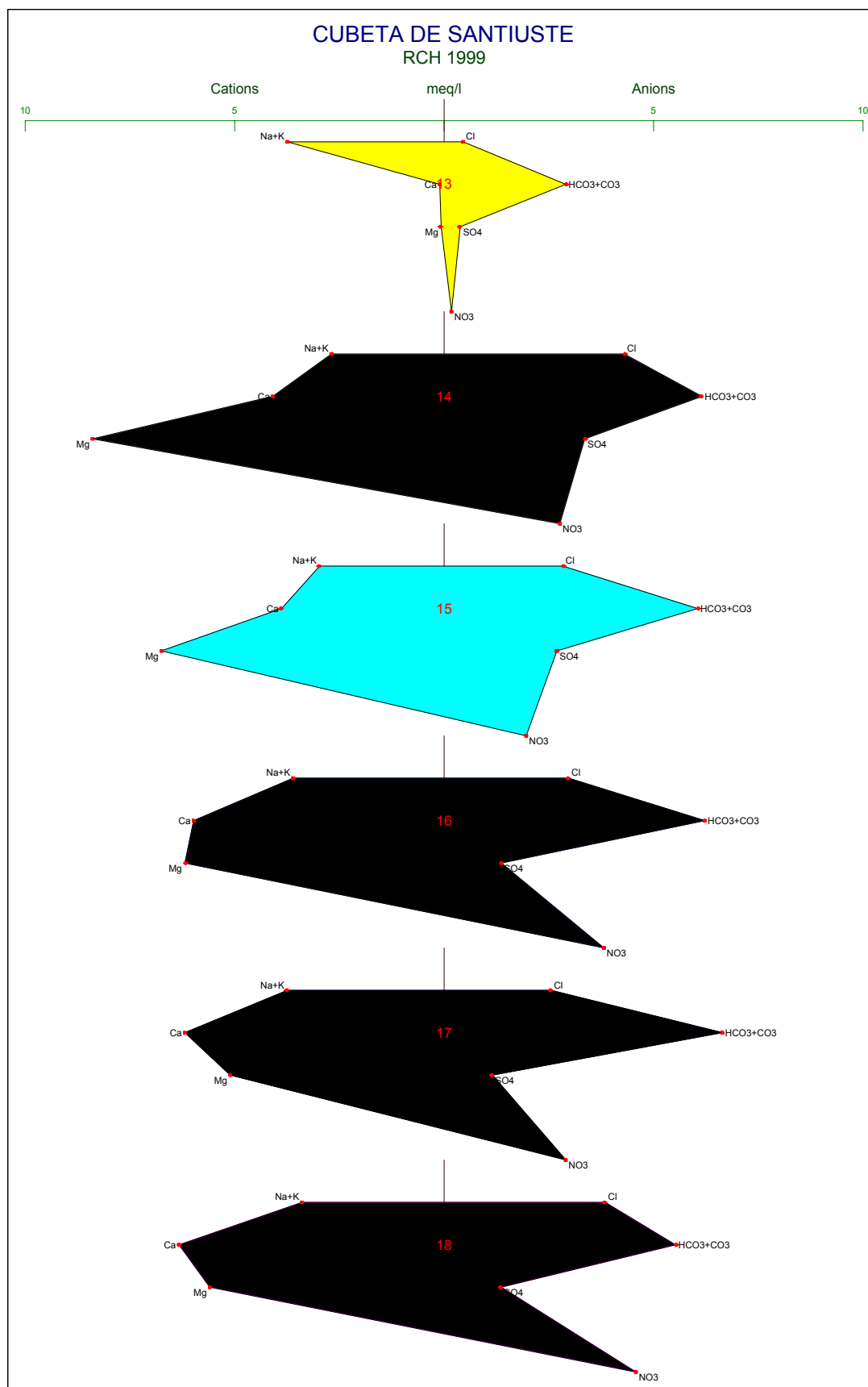
Los diagramas elegidos han sido el de Stiff (para cada una de las muestras), un mapa de Stiff con la ubicación geográfica de todas ellas, el de Piper y el de Scatter.

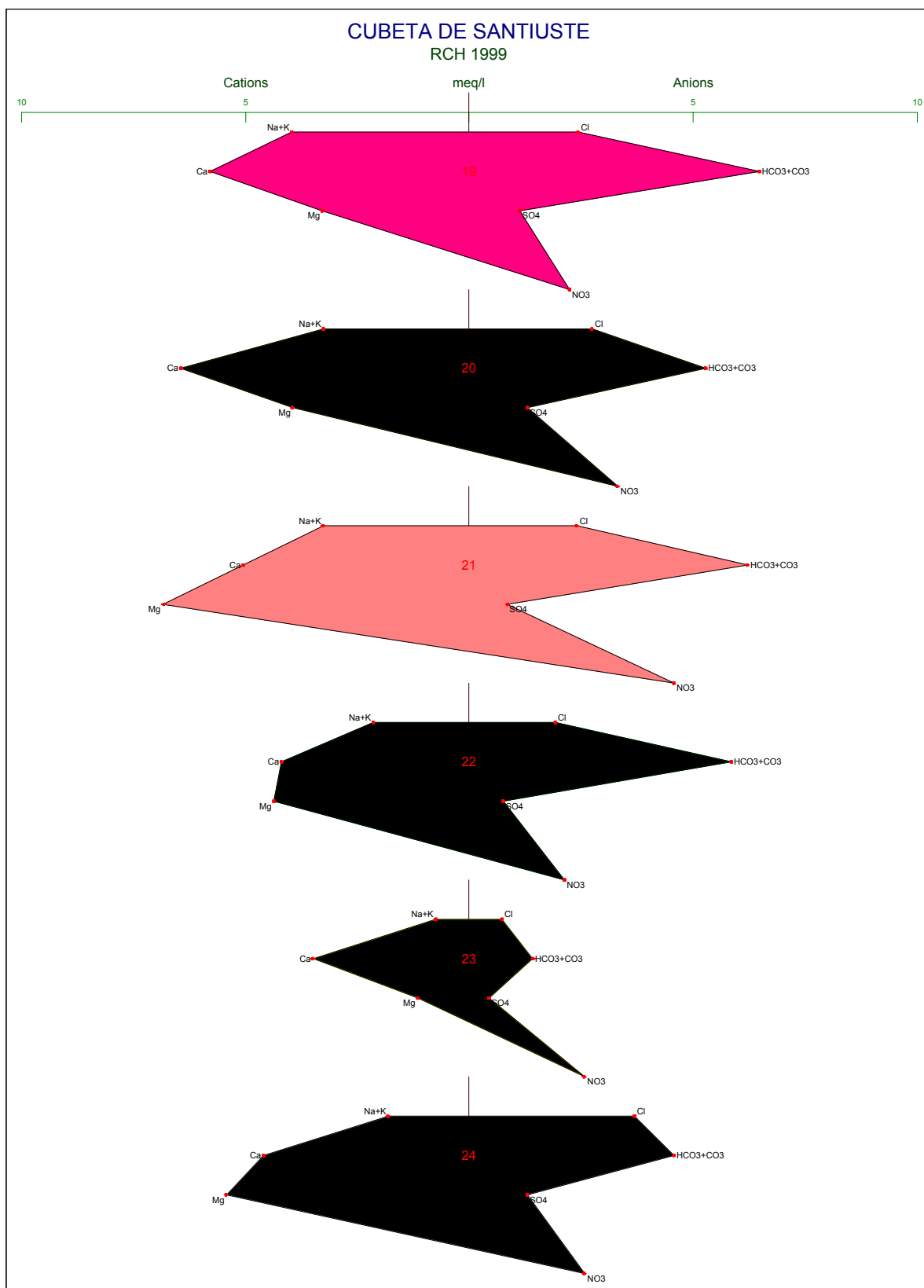
Los **diagramas de Stiff** realizados permiten establecer distintas familias según sus características hidroquímicas, por lo general vinculadas con el contexto geológico de las formaciones por las que avanzan. En nuestro caso específico se pueden diferenciar tres familias o tipologías de muestras de acuerdo con la profundidad de las captaciones y la presencia de focos contaminantes, bien sean antrópicos (abonado, aguas residuales) o naturales (lagunas salinas).

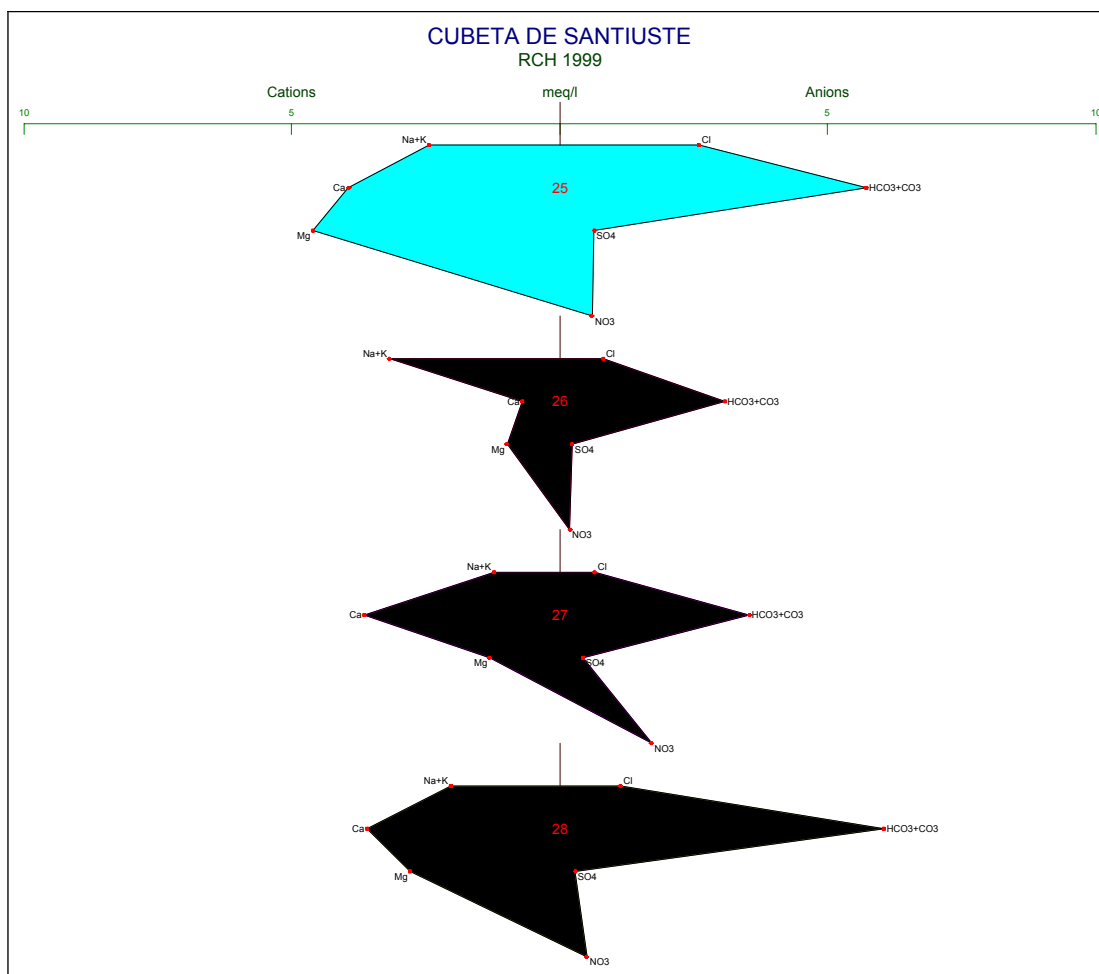
El número situado en la parte central de cada diagrama corresponde a número de muestra de la Red de Control de la Hidroquímica, determinaciones de 1999 (fase preoperacional), captaciones de profundidad inferior a 75 m (Figs. 3.18 a-e).











Figs. 3.18 a) a e). Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff. Determinaciones de 1999 (fase preoperacional), captaciones de profundidad inferior a 75 m.

El **hidrograma de Piper-Hill-Langelier** permite establecer tres familias de facies de acuerdo con su quimismo.

1) Las pertenecientes a la primera de ellas se caracterizan por ser aguas jóvenes asociadas a un acuífero superficial, con tiempos de residencia en el acuífero relativamente cortos.

Los puntos más representativos con una analítica cercana al promedio de todos los análisis son el 9, 15 y 16, ubicados en la zona central de la *Cubeta* (Fig. 3.19).

2) La segunda de las “familias” engloba una serie de muestras dispares entre sí, por lo que no es apropiado establecer una composición representativa para captaciones de este intervalo de profundidad. A pesar de los indicios de contaminación detectados, la muestra de composición más próxima a la media sería la número 18 (Fig. 3.20).

3) La tercera “familia” está integrada por las facies de los sondeos más profundos. La principal característica es ser aguas maduras y muy evolucionadas, de circulación regional, tiempos de residencia en el acuífero elevados y procedencia profunda, como atestigua el carácter hipotermal de las captaciones 2 y 5 (Fig. 3.21).

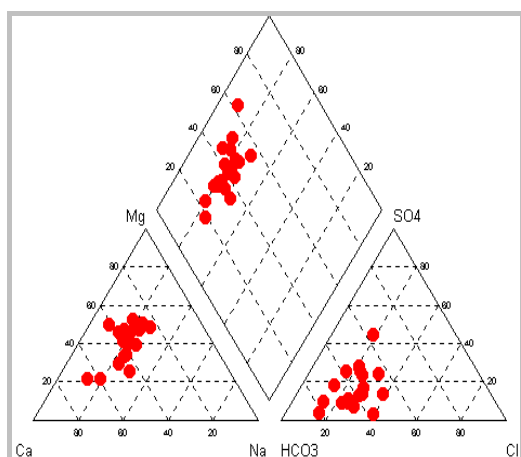


Fig. 3.19. Representación en un diagrama de Piper de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad inferior a 75 m.

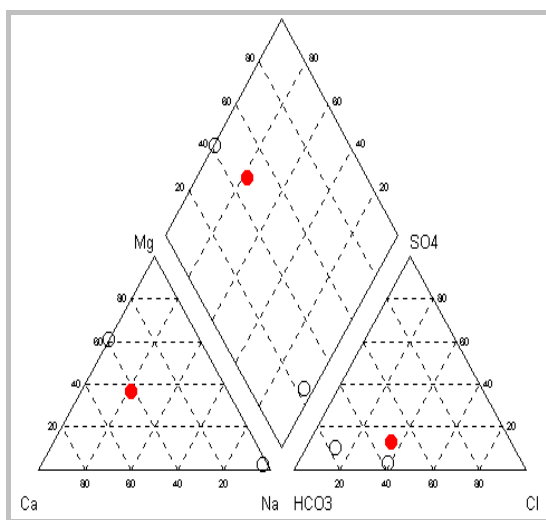


Fig. 3.20. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad entre 75 y 150 m.

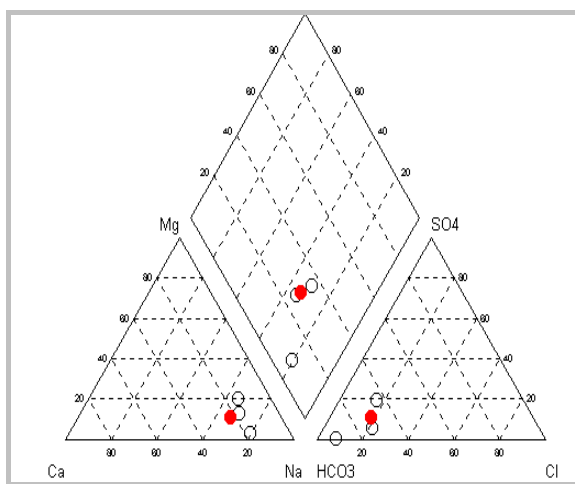


Fig. 3.21. Representación en un diagrama de Piper de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad superior a 150 m.

El punto más representativo por presentar una analítica cercana al promedio de todos los análisis es el n.º 5.

Los **diagramas de Scatter** permiten el estudio “en relativo” de la evolución de los iones macroconstituyentes con la conductividad. Este diagrama consta de gráficas que contienen una nube de dispersión de cada par de valores de todas las muestras de una región. El ajuste de una recta de regresión permite cuantificar el aumento de los iones macroconstituyentes con el aumento de la conductividad del agua y su relación, que será mayor a mayor pendiente de la recta interpolada.

Los diagramas de *Scatter* realizados han sido:

- Conductividad-cloruro (Fig. 3.22).
- Conductividad-sulfato (Fig. 3.23).
- Conductividad-nitrato (Fig. 3.24).
- Conductividad-bicarbonato+carbonato (Fig. 3.25).
- Conductividad-sodio (Fig. 3.26).
- Conductividad-sodio+potasio (Fig. 3.27).
- Conductividad-calcio (Fig. 3.28).
- Conductividad-magnesio (Fig. 3.29).

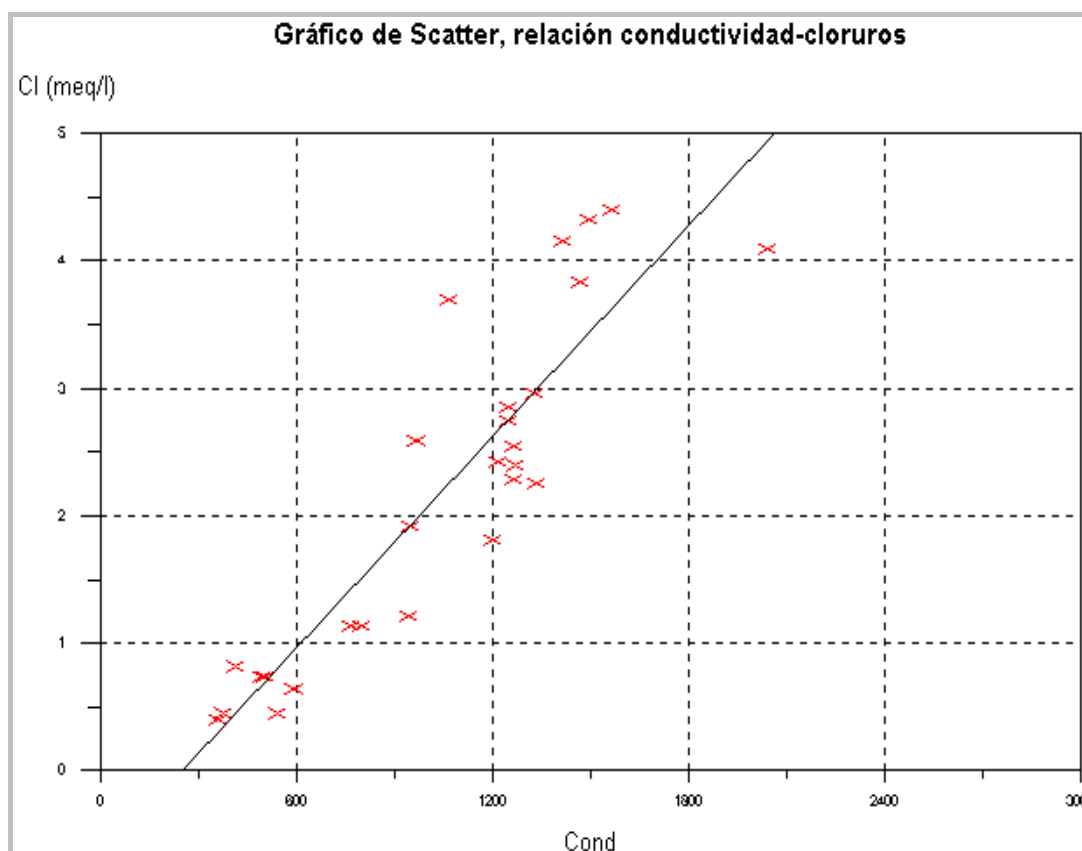


Fig. 3.22. Diagramas de Scatter Conductividad-cloruro.

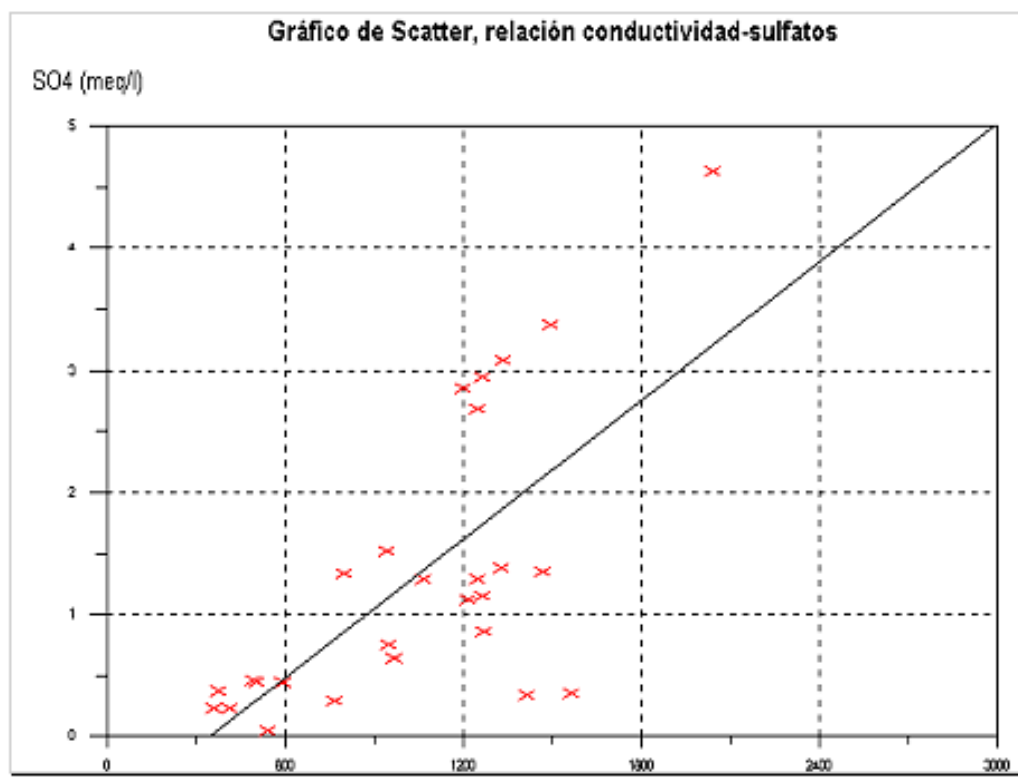


Fig. 3.23. Diagramas de Scatter Conductividad-sulfato.

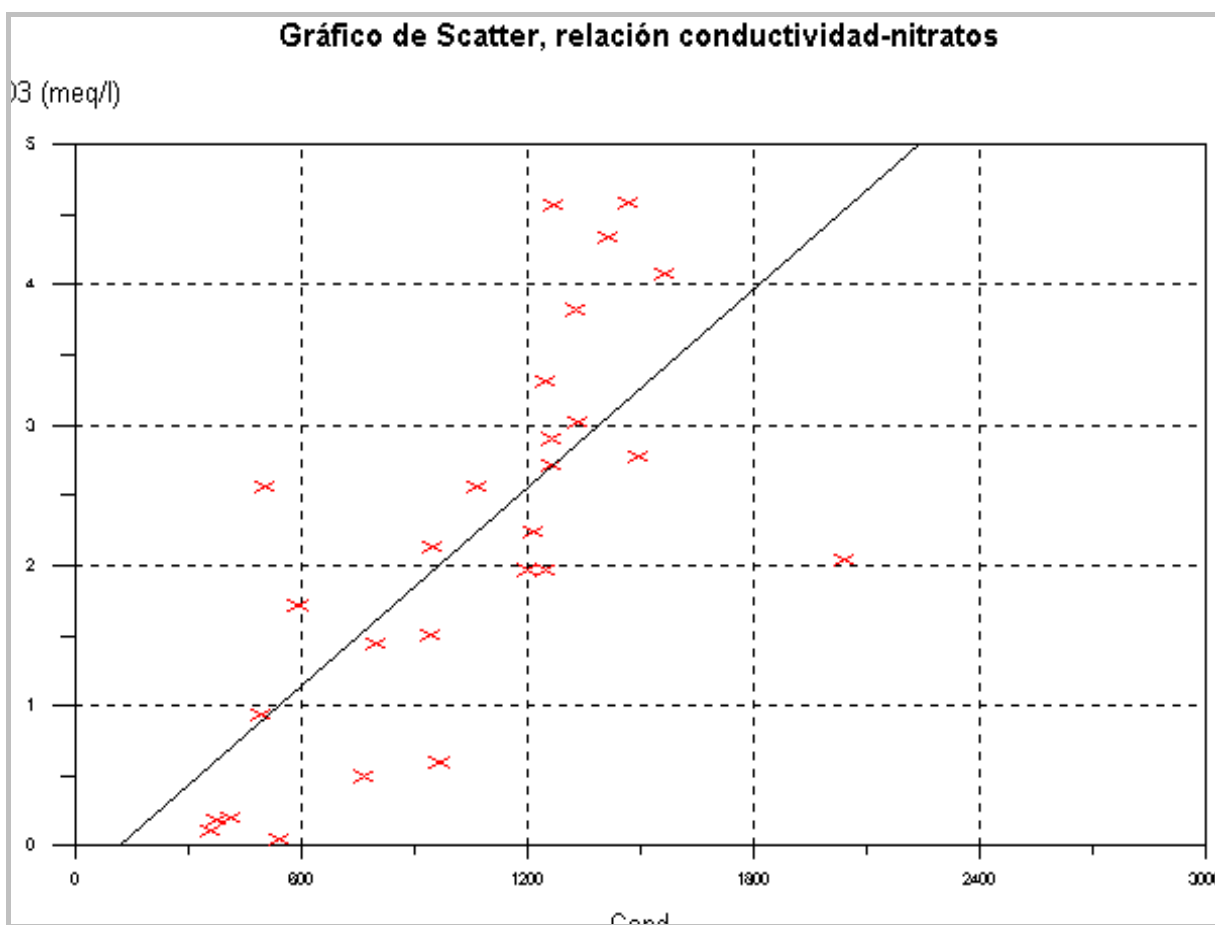


Fig. 3.24. Diagramas de Scatter Conductividad-nitrato.

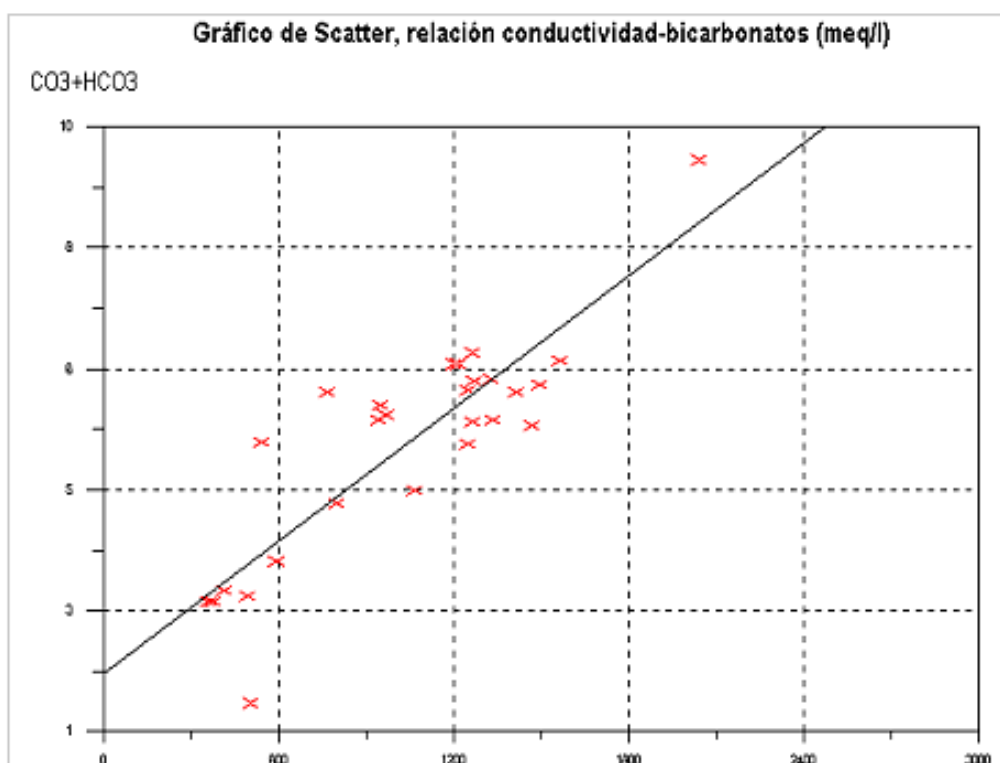


Fig. 3.25. Diagramas de Scatter Conductividad-bicarbonato+carbonato.

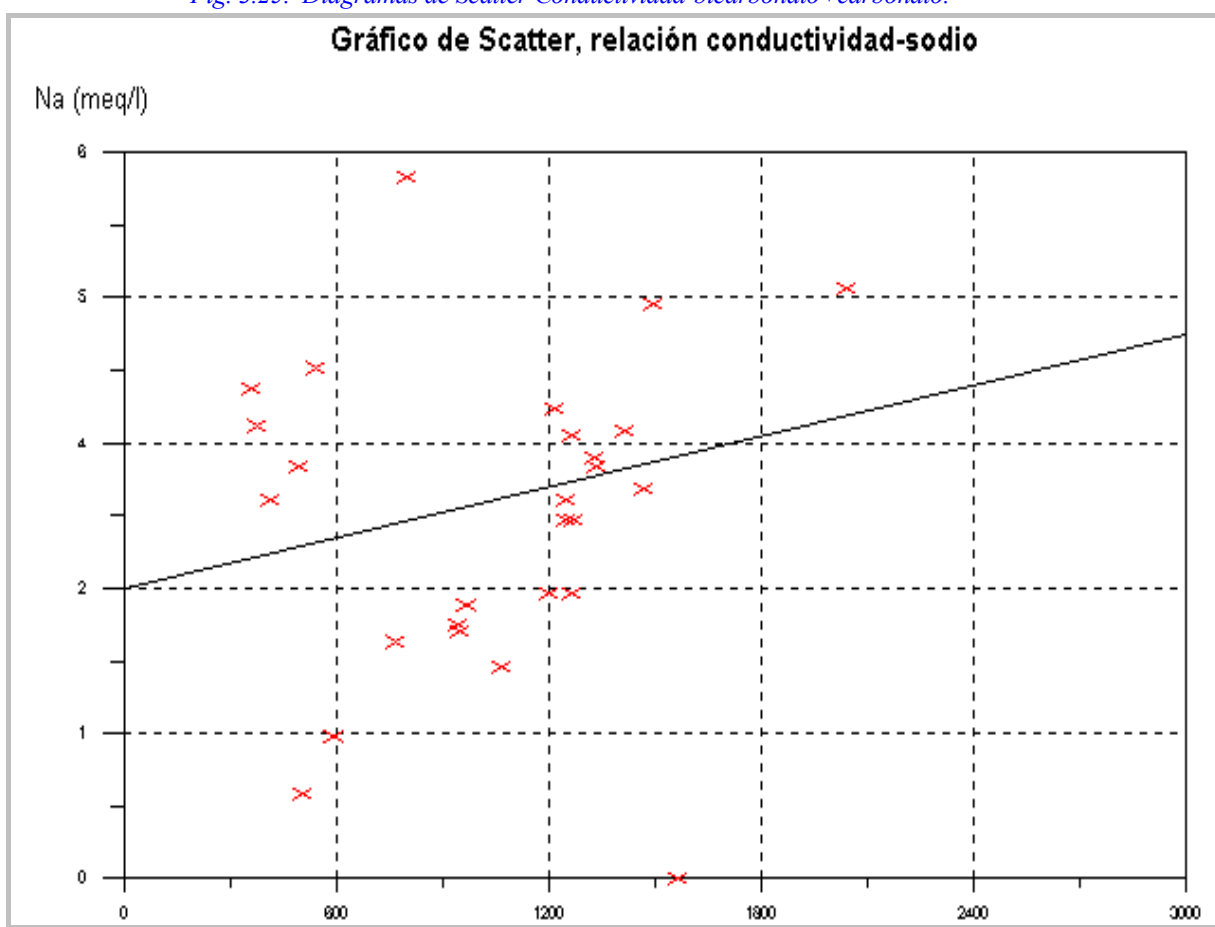


Fig. 3.26. Diagramas de Scatter Conductividad-sodio.



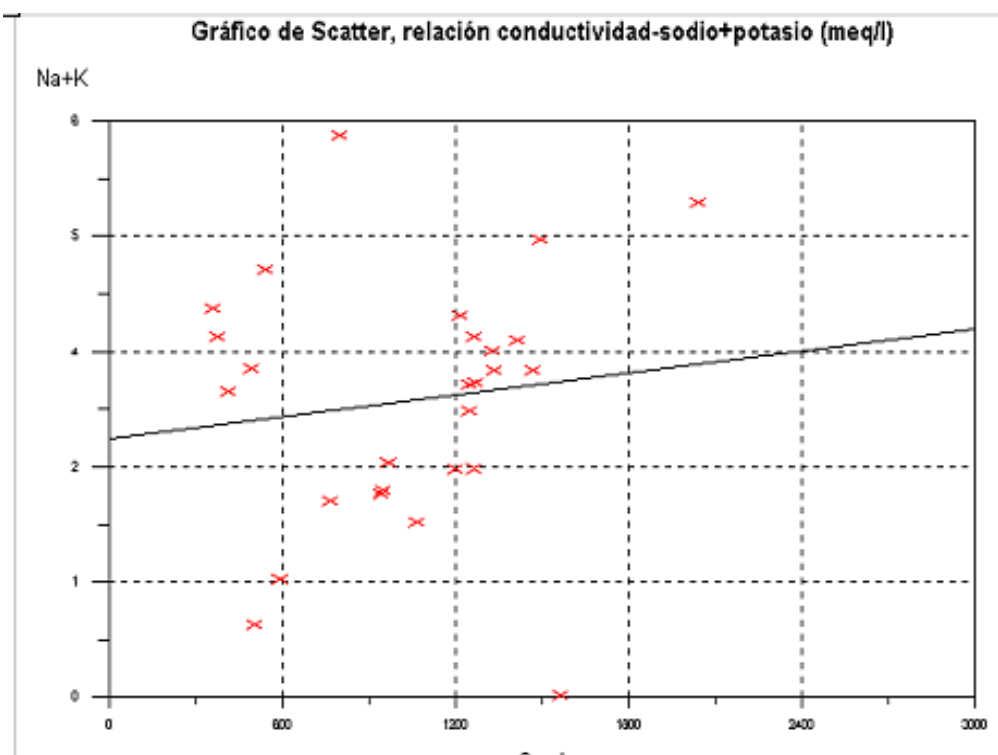


Fig. 3.27. Diagramas de Scatter Conductividad-sodio+potasio.

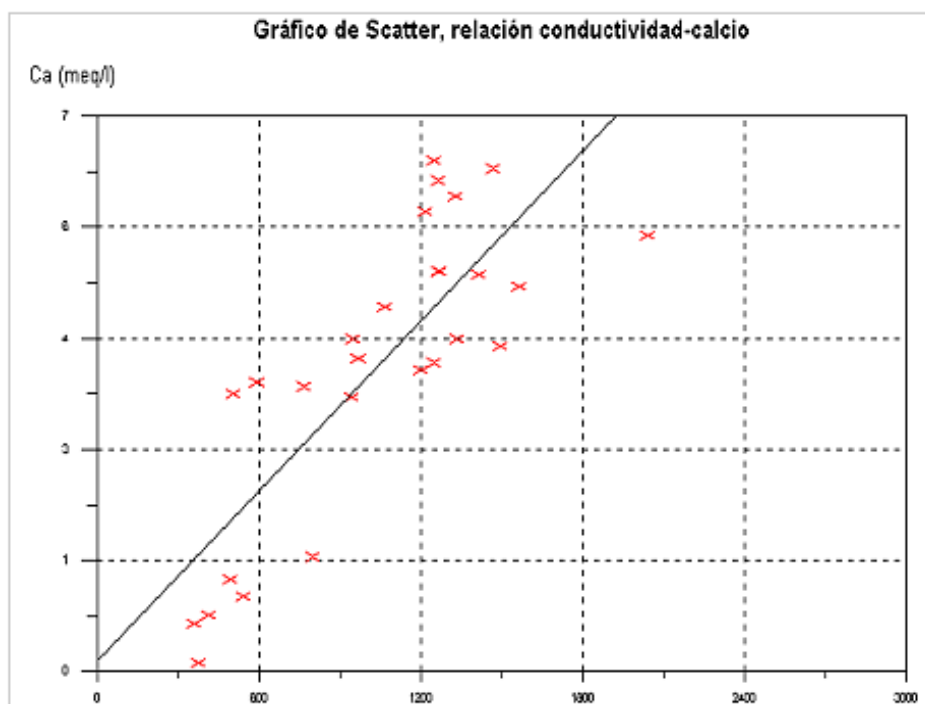


Fig. 3.28. Diagramas de Scatter Conductividad-calcio.

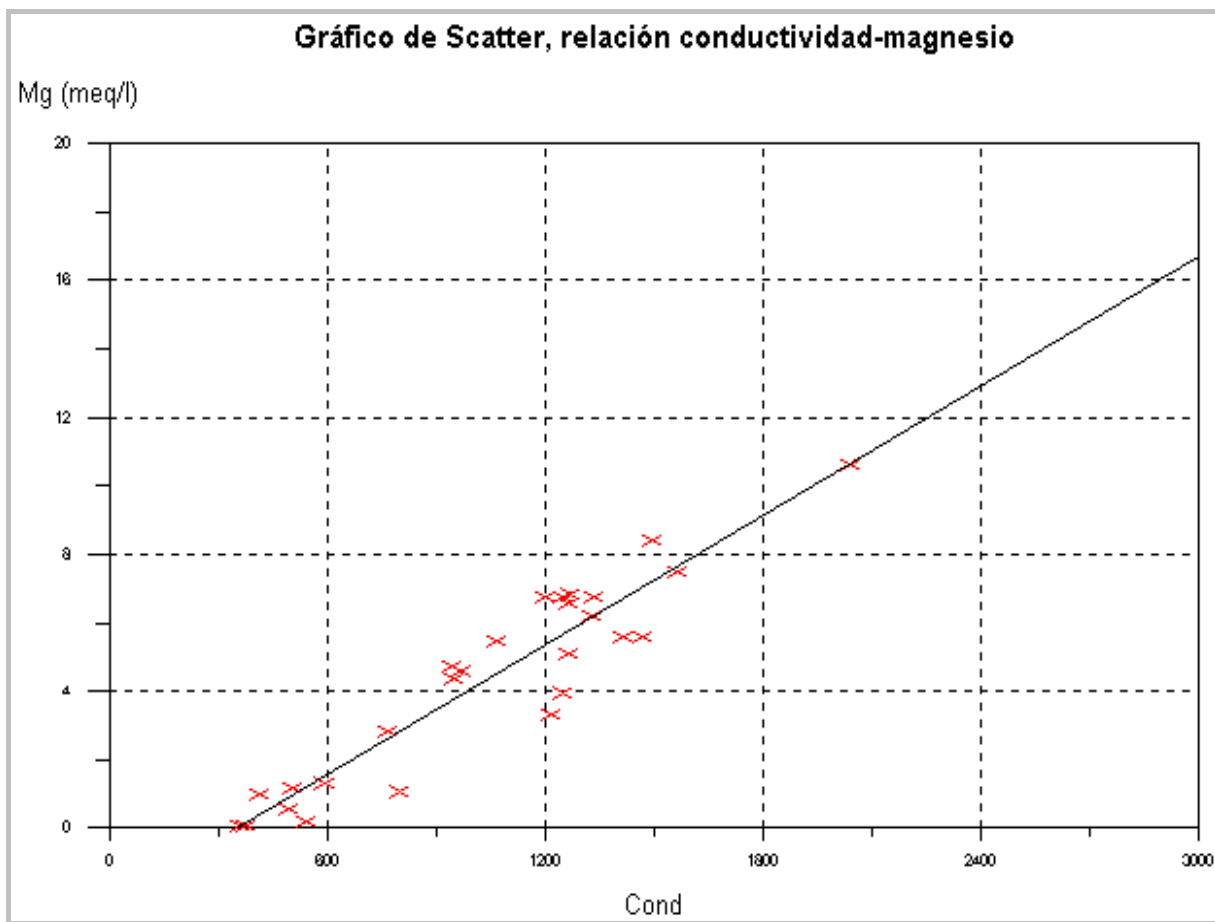


Fig. 3.29. Diagramas de Scatter Conductividad-magnesio.

Las pendientes de las rectas de regresión indican que las concentraciones de los iones macroconstituyentes aumentan cuando lo hace la conductividad del agua.

- conductividad-cloruro

$$Y \text{ (meq/l)} = 2,758 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 0,689$$

- conductividad-sulfato

$$Y \text{ (meq/l)} = 1,892 \cdot 10^{-3} X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 31,635$$

- conductividad-nitrato

$$Y \text{ (meq/l)} = 2,362 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 0,284$$

- conductividad-bicarbonato+carbonato

$$Y \text{ (meq/l)} = 3,287 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} + 1,864$$

- conductividad-sodio

$$Y \text{ (meq/l)} = 7,004 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} + 2,081$$

- conductividad-sodio+potasio

$$Y \text{ (meq/l)} = 3,805 \cdot 10^{-4} X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} + 2,687$$

- conductividad-calcio



$$Y \text{ (meq/l)} = 3,564X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} + 0,138$$

- conductividad-magnesio

$$Y \text{ (meq/l)} = 6,321X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 2,244$$

Estos resultados indican que la mayor contribución a la salinidad del agua corresponde al anión CO_3H y la menor al ión $\text{SO}_4^{=}$, cuyo coeficiente de correlación es bajo. En cuanto a los cationes la pendiente mayor corresponde al sodio y la menor al potasio, siendo mayor para el magnesio que para el calcio.

• Cartografías de isocontenidos

La variación espacial de todos los iones que componen las muestras analizadas resulta fácilmente accesible a partir de la observación de los mapas de isolíneas (líneas que unen puntos de igual concentración de alguna sustancia específica, parámetro o relación iónica).

Los mapas hidroquímicos generados han sido realizados especialmente para el acuífero superficial. El motivo es debido a la gran variación hidroquímica entre las aguas de los distintos acuíferos, de forma que, elaborando cartografías de “mezclas de aguas” de distintos niveles, no se puede apreciar la evolución hidroquímica del agua en el espacio y en el tiempo con claridad. También se trata del acuífero objetivo para las operaciones de recarga artificial en el que resulta más procedente controlar su evolución. Además, las muestras obtenidas en los acuíferos intermedio y profundo (cuatro en cada uno), podrían introducir un margen de error importante, como consecuencia de la escala de trabajo y del espaciado del muestreo.

Un factor a tener en cuenta es la presencia de zonas puntuales en la superficie del terreno donde se producen mezclas de aguas de distintos niveles acuíferos por bombeo de los sondeos profundos, riego y posterior infiltración (efecto conocido como *reciclaje*). Esta agua de mezcla interaccionan con las extraídas de las captaciones epidérmicas, lo que ha llevado a determinadas zonas del acuífero superficial a presentar una salinidad y alcalinidad mayor que otros sectores de litología similar en superficie.

La unidad adoptada ha sido el mg/l, al expresar las variaciones con mayor contraste y tener mayor rango de variabilidad que el meq/l.

Los mapas generados han sido: isoconductividad, cloruros y nitratos, iones que se considera que son representativos del grado de contaminación alcanzado. Además aportan indicios importantes de la hidroquímica del acuífero y permiten establecer un punto de partida para su posterior seguimiento.

Estas cartografías se presentan en el Anexo 3.1.2.4. *Cartografía temática. mapas de isocontenidos para el acuífero superficial*, integrado en un tomo independiente de la memoria con objeto de facilitar su observación simultánea.

Adicionalmente se han elaborado cartografías indicativas de la alcalinidad y salinidad: un mapa de isocontenidos de iones alcalinos (sodio y potasio) y otro de alcalino-

térreos (calcio y magnesio). Los mapas de isocontenidos aniónicos corresponden a los aniones mayoritarios.

En definitiva, las cartografías generadas han sido:

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ión Cl^-
- Distribución de la concentración de ión NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$).
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$).
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$
- Distribución de ión $\text{SO}_4^{=}$

Estos mapas se adjuntan en el Anexo 3.1.2.4. *Cartografía temática. Mapas de isocontenidos para el acuífero superficial.*

Las observaciones más importantes derivadas del análisis de estos mapas son:

– Distribución de conductividad del agua

El mapa hidroquímico correspondiente a la distribución de la conductividad del agua elaborado con los puntos de control del acuífero superficial permite apreciar que la conductividad oscila entre 526 y 2.030 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La media del agua que circula por el acuífero ronda los 1.213 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores del acuífero inferior oscilan alrededor de 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Las zonas de mayor conductividad se localizan en las inmediaciones de las lagunas salinas desecadas que aparecen dispersas por la zona de estudio, especialmente en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, al norte de Villagonzalo de Coca y en el extremo noroeste de la *Cubeta*, donde en algunos casos se sobrepasan los 12.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. También en la zona de vertido de aguas residuales de Santiuste, donde parece haberse concentrado una destacable salinidad.

De acuerdo con la piezometría y la distribución de las isolíneas, se constata que el acuífero descarga en los ríos Voltoya y Eresma, si bien el sector meridional oriental presenta un funcionamiento individualizado con respecto al occidental, siendo la divisoria hidrogeológica constituida por el afloramiento de margas del “*Cuerno de la Revilla*” la línea de separación.

En general se percibe un gradiente descendente en el Sector Norte desde las zonas más salinas hacia el cauce del río Eresma y el tramo final del Voltoya. En el sector meridional se aprecia que las isolíneas cortan al cauce fluvial de manera semiperpendicular, al igual que en el extremo septentrional, corroborando la desconexión río-acuífero. los ríos Eresma y Voltoya.

Estas zonas no coinciden con un incremento paralelo de ión NO_3^- , en cambio, los altos valores de conductividad registrados en el eje de la *Cubeta* de Santiuste entre esta

localidad y Villagonzalo (en torno a $1.200 \mu\text{S}/\text{cm}$) sí presentan similitud con el mapa de nitratos y cloruros, por lo que parece evidente que la alta conductividad se encuentre relacionada con polución del acuífero con aguas residuales conducidas por la cacera de Santiuste y procedentes de esta localidad. El domo coincide además con la presencia de granjas porcinas en el sector, si bien esta posibilidad no ha sido estudiada.

La distribución de isolíneas es bastante homogénea. Si se omitiese el peso del valor de las captaciones emplazadas cerca de las lagunas salinas y de los sondeos profundos 5, 6, 7, 12 y 13 (este último anómalamente bajo), se aprecia una distribución de la conductividad más o menos lineal y semiparalela al trazado del arroyo de la Ermita, que discurre aproximadamente por el eje de la *Cubeta*, y en menor medida, con el trazado de los cauces del Eresma y Voltoya. Las inflexiones son atribuibles a la presencia de afloramientos terciarios y la mezcla de aguas con las extraídas de sondeos profundos de baja conductividad y alta basicidad por lo general.

Es de destacar, por su baja conductividad, las aguas subterráneas de los sondeos “profundos” 5, 7 y 26; y de los “intermedios” 6 y 18 (numeración acorde al Anexo 3.1.2. *Red de control de la hidroquímica, fase preoperacional (RCH-1999)*). En los tres restantes de este rango de profundidades se registran valores mayores.

– Distribución de la concentración de ión Cl^-

Como puede verse en la cartografía de distribución del ión cloruro, las zonas que contienen aguas con mayor concentraciones se sitúan entre Ciruelos de Coca (donde hay lagunas salinas desecadas) y Coca. También en el entorno del vertido de aguas residuales de Santiuste (los puntos 11, 18, 24 y 25 se encuentran sobresaturados en halita), y al noroeste del Sanchón, coincidiendo con una zona del acuífero bastante potente. Los restantes valores se sitúan en torno a estos dos umbrales.

Si se tiene en cuenta la composición de los sondeos profundos, de bajo contenido en cloruros, las isolíneas presentan valles que confirman la tendencia anterior.

Las aguas menos cloruradas se encuentran en la cabecera del arroyo de La Ermita y en los extremos norte y sur de la zona de estudio.

Al contrario de lo que sucede con la conductividad, la distribución de la concentración de ión cloruro no presenta paralelismo con los cauces fluviales existentes, sino más bien todo lo contrario. Las isolíneas presentan paralelismo en torno al umbral central, con gradientes descendentes hacia el norte y sur, y son ortogonales u oblicuas a los cauces, al igual que sucede con la distribución del ión sodio. Este hecho parece ser debido a la presencia de afloramientos terciarios en el extremo sur de la *Cubeta* y eventuales lentejones salinos en el sector occidental, confirmando la escasa o nula influencia del agua del río en el contenido en cloruros de las aguas del acuífero, lo que supone un nuevo indicio de que el río es ganador. Existen algunos puntos que dejan lugar a dudas en esta afirmación, como es la zona de los manantiales de Villeguillo en el río Eresma y en la desembocadura de la cacera de Betaya, donde las isolíneas son semiparalelas.

La presencia de dos umbrales originados por concentraciones excesivas de cloruros (bien sean naturales o por contaminación) en el sector central y en la zona de vertido de aguas residuales de Santiuste dificulta la interpretación de un esquema del flujo subterráneo.

– Distribución de la concentración de ión NO_3

El origen de este ión está asociado con la actividad agrícola de la zona y, a una escala más puntual, con la contaminación del acuífero con aguas residuales procedentes de la cacería. También se han detectado nitratos en el agua de lluvia en concentración inferior a 3 mg/l, lo que indica que la presencia de este ión es natural en el área en bajas concentraciones.

La distribución de las isolíneas sigue un comportamiento parecido al de los cloruros, lo que confirma la importancia de los focos de contaminación en la calidad hidroquímica de las aguas del acuífero superficial.

En la mayor parte del acuífero, la concentración de ión NO_3 sobrepasa los 10 mg/l, detectándose incluso valores de 283 mg/l en el punto 21 y 284 mg/l en el punto 18. Ambos puntos se encuentran ubicados en las inmediaciones de la cacería y en un foco “aguas abajo” de un núcleo donde se concentran varias granjas porcinas de las 74 granjas inventariadas en la zona de estudio durante la realización de este trabajo de investigación (que figuran en la cartografía comentada). Por lo que al efecto de las aguas residuales en el acuífero puede haber influencia de vectores de contaminación consuntiva sobrepuestos.

Las máximas concentraciones están en las zonas de intensa actividad agrícola y en los sectores del acuífero de mayor espesor, donde se concentran en la zona saturada.

Las concentraciones mínimas se sitúan en las inmediaciones de los sondeos profundos con dilución de los nitratos, en los extremos norte y sur y en las inmediaciones de Villagonzalo.

La distribución de isolíneas es bastante homogénea. Si se omitiese el peso del valor de las captaciones emplazadas en focos contaminantes evidentes y de los sondeos profundos con poca carga nitrática, se aprecia una distribución de las isolíneas más o menos lineal y semiparalela al eje de la *Cubeta*, coincidente con el trazado del Arroyo de la Ermita. También guarda cierto paralelismo con los cauces del Eresma y Voltoya.

La existencia de un sondeo de profundidad superior a los 100 m con 284 mg/l (n.º 18) es un claro indicio de la mezcla de aguas y del paso de aguas fuertemente cargadas de contaminantes hacia los compartimentos del acuífero regional más profundos. Este sondeo está ubicado en las inmediaciones de varias granjas agrarias y de la cacería de Santiuste (indicio de foco puntual conservativo).

Las isolíneas cortan a los cauces fluviales principales de manera perpendicular en general, corroborando de nuevo su carácter ganador. Con respecto al arroyo de la Ermita no se aprecia que la distribución esté marcada por la circulación de agua en este arroyo, por lo menos en esta etapa preoperacional.

– Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)

Esta cartografía presenta gran similitud con la de distribución de ión sodio, en vista de los bajos contenidos en potasio en los puntos de la red, excepto en dos captaciones.

En general se aprecia un domo en la zona de Ciruelos y Villagonzalo de Coca, cuya concentración disminuye con la distancia. Un nuevo máximo se ubica en la zona de vertido de aguas residuales, lo que corrobora la baja calidad hidroquímica de las aguas del acuífero en este sector por efecto antrópico. Un tercer domo se ubica en la zona del Sanchón, en cabecera de la cadera de Betaya coincidiendo con un dren del acuífero.

Los valores de sodio son más abundantes en los sondeos *intermedios* y *profundos* que en las captaciones hipodérmicas. Las concentraciones máximas aparecen en las muestras de los sondeos 2, 6, 7 y especialmente en el pozo 10 por su cercanía a las lagunas salinas ya mencionadas. Las muestras de los puntos 11, 18, 24 y 25 presentan saturación en halita.

Sobreponiendo la cobertura de posición de los puntos de la RCH al mapa de isopacas obtenido a partir de la interpretación de la campaña de prospección geofísica, se detecta que los valores máximos de sodio se ubican, más o menos, en el depocentro de las “cubetas” o paleorrelieves rellenos de arenas eólicas cuyo espesor es superior al de las zonas restantes (MAPA, 1999a; Galán et al, 2001). Esto puede ser debido a que las perforaciones fueron realizadas con un buen conocimiento del espesor del acuífero cuaternario, o bien a la incidencia de estas cubetas en la acumulación de sodio. A esta observación hay que añadir que el punto 9, ubicado en el depocentro de una cubeta, presenta valores de sodio relativamente bajos, lo que puede ser atribuible a su profundidad (18 m).

La asociación del sodio a los sondeos más profundos coincide con un modelo conceptual tipo *Tóth* a escala regional, que asocia las facies bicarbonatadas sódicas al flujo regional profundo del acuífero regional.

El contenido en potasio frente al sodio es mínimo. Solo se han detectado concentraciones importantes en los puntos 10 y 21, el primero por su vinculación con las lagunas salinas, y el segundo posiblemente por contaminación puntual.

La tendencia de las isolíneas en el extremo sur de la cubeta está influida por el gradiente hidráulico. El acuífero se drena en dirección noreste y las aguas presentan un leve enriquecimiento en sodio en su transcurso hacia los cauces fluviales.

La zona central presenta importantes focos de contaminación natural y antrópica por lo que resulta difícil extraer una tendencia evolutiva general. Se trata de una zona donde convergen singularidades muy diversas (lentejones salinos, depresiones colmatadas de sedimentos eólicos y de piedemonte de las colinas terciarias, lagunas salinas fosilizadas, cultivos con abundante abonado, humedales degradados, etc.).

La mitad norte presenta un comportamiento diferente, atribuible en gran medida a la variación de la litología del sustrato. Las isolíneas de iones alcalinos se disponen

semiparalelas al eje de la *Cubeta*. Según el gradiente hidráulico, el agua que discurre por este tramo hacia las zonas de descarga adquiere una sodificación mayor que en la mitad sur.

– Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)

Estos iones son los mayoritarios en las captaciones más someras de la zona de estudio. De hecho, todas las muestras contienen dolomita en disolución (a excepción del sondeo 13), y, en algunos casos, calcita y/o aragonito (especialmente en los sondeos profundos).

La evolución de estos iones presenta una tendencia similar a la de los bicarbonatos y sulfatos para las captaciones más someras, ya que los sondeos profundos presentan mayor vinculación entre los bicarbonatos y el sodio. Las concentraciones máximas se han registrado en torno a los sondeos intermedios n.º 6 (al sur de Villeguillo) y 13 (al este de Villagonzalo de Coca). El pozo “salino” n.º 10 presenta de nuevo la mayor concentración catiónica, al estar intercalado en un antiguo sistema de humedales muy deteriorado en la actualidad.

La distribución de la dureza en las aguas del acuífero presenta una tendencia más o menos clara. En la zona central se ajusta en cierta medida al eje de la *Cubeta* y al trazado del arroyo de la Ermita, con disminución bilateral hacia los márgenes. En los extremos norte y sur presenta un cierto paralelismo con el mencionado eje, influidos por la presencia de humedales (norte) y la zona de mayor contaminación antrópica (sur).

– Distribución de la concentración de los iones bicarbonato y carbonato (CO_3H^- y CO_3^{--})

Como puede verse en esta cartografía hidroquímica, la concentración de ión CO_3H^- en el acuífero varía, generalmente, entre 200 y 400 mg/l, con una distribución bastante irregular aunque acorde con los iones alcalinotérreos. El valor máximo se encuentra en el punto 10 de Ciruelos de Coca, asociado a la elevada salinidad superficial de la zona.

Las mayores concentraciones se observan en el sector occidental de la *Cubeta*, con un gradiente descendente hacia el eje del acuífero superficial. También asociados a los sondeos de profundidad intermedia y profunda, que presentan aguas de alta alcalinidad. También hay concentraciones importantes en los focos de contaminación inventariados entre Santiuste de San Juan Bautista y Coca (cabecera de la cacería de Betaya). Las concentraciones menores se observan en los márgenes de la *Cubeta* y asociados a los afloramientos de materiales terciarios.

Los sondeos profundos de los extremos norte y sur presentan calcita o aragonito en disolución, aunque en ningún caso las muestras están saturadas en estos componentes. Las captaciones 19, 20 y 23 también presentan cantidades significativas de estos minerales. Tan solo se ha detectado ión carbonato en las captaciones 6, 13 y 26, todas correspondientes a sondeos intermedios o profundos.

La mayoría de las captaciones de la zona central se encuentran sobresaturadas en dolomita, a excepción de los sondeos profundos.

Las isolíneas presentan en la zona central una tendencia más o menos paralela al eje de la *Cubeta* y a los cauces fluviales principales, incluido el arroyo de la Ermita, especialmente si se rechazan los puntos con signos de contaminación y los sondeos profundos. Este hecho corrobora la contribución del río a la descarga del acuífero superficial en la zona central, con mayor desconexión en los extremos, si bien la carencia de datos externos introducen un cierto grado de incertidumbre.

Con los datos obtenidos no se ha podido caracterizar la distribución de los bicarbonatos en el acuífero profundo.

– Distribución de ión sulfato SO_4^-

La concentración de ión SO_4^- en el acuífero se mantiene alrededor de un valor medio del orden de 50 mg/l (límite de potabilidad). Las máximas concentraciones se han detectado en las captaciones 4, 10, 14 y 15. La muestra 4 presenta sobresaturación en anhidrita con carácter puntual, la 10 también por asociación a la zona más salinizada de forma natural de las inmediaciones de Ciruelos de Coca. Las captaciones 14 y 15 corresponden a *minisondeos* con sobresaturación en anhidrita de nuevo con carácter puntual en el sector central de la unidad Morfogenética meridional occidental. En torno a la captación 11 hay un nuevo máximo, coincidiendo con la zona de separación entre los sectores norte y sur de la *Cubeta*. En todos los casos hay vinculación con el contenido en alcalinotérreos.

La isolínea de 10 mg/l discurre casi paralela al río Voltoya, con ligeras inflexiones al ajustarse a los umbrales o zonas de máxima concentración de la *Cubeta*. Esta disposición resulta en principio incompatible con la existencia de un flujo regional que produzca la mezcla de aguas de distintos compartimentos del acuífero.

Cuatro cartografías adicionales de relaciones iónicas elaboradas con la totalidad de los datos de la red de control de la hidroquímica son comentadas en el próximo apartado e incorporadas al Anexo 3.1.2.5. *Cartografía temática . Mapas de isorrelaciones iónicas.*

• Cartografías de isorrelaciones iónicas

Se trata de una técnica de investigación escasamente tratada en los antecedentes consultados que permite abordar, mediante el empleo de una herramienta de aceptación general como son los índices hidrogeoquímicos, la distribución de facies en el acuífero, la evolución de las aguas subterráneas, y, consecuentemente, el funcionamiento del acuífero.

De todos los índices calculados (relación magnesio/calcio, potasio/sodio, cloruro/bicarbonato, sulfato/cloruro, sodio/calcio, sodio/cloruro, calcio/sulfato, calcio/magnesio, sodio/(calcio+magnesio), sulfato/calcio, relación cuadrática del calcio/bicarbonato, e índices químicos iónicos y de cambio de bases),

A estos hay que añadir el cálculo de isorrelaciones iónicas, en concreto la relación magnesio/calcio, potasio/sodio, cloruro/bicarbonato, sulfato/cloruro, sodio/calcio, sodio/cloruro, calcio/sulfato, calcio/magnesio, sodio/(calcio+magnesio), sulfato/calcio, relación cuadrática del calcio/bicarbonato, índices químicos iónicos (índice catiónico y aniónico) y de cambio de bases.

Se han seleccionado los cuatro primeros para la elaboración de cartografías, al ser índices que han demostrado gran efectividad para los fines previstos, que son:

- Magnesio/calcio
- Potasio/sodio
- Cloruro/bicarbonato
- Sulfato/cloruro

– Distribución de isorrelaciones iónicas magnesio/calcio

Esta isorrelación presenta una clara distribución desde las zonas de recarga del acuífero hacia las zonas de descarga “*aguas abajo*” según el gradiente hidráulico.

En general los valores más altos se localizan en el eje de la *Cubeta* y en las inmediaciones de Ciruelos de Coca.

El índice presenta un descenso paulatino hacia las zonas de descarga, con fuertes anomalías en zonas de contaminación antrópica y coincidiendo con los drenes supuestos de la *Cubeta*. Las restantes anomalías del sector septentrional son más atribuibles a la carencia de datos o problemas de interpolación que a anomalías del acuífero en la zona de pinares, ya que las restantes técnicas empleadas no han desvelado irregularidades especiales en estos sectores.

– Distribución de isorrelaciones iónicas potasio/sodio

De acuerdo con este índice se aprecian de nuevo dos sectores claramente disociables. Por un lado en la zona meridional hay una evolución de las aguas subterráneas “*normal*” desde las zonas de recarga hacia las de descarga, con mineralización por envejecimiento coincidente con el gradiente hidráulico de las aguas del acuífero superficial (NE-SO).

En el sector coincidente con los drenes supuestos de la cabecera de la cacera de Betaya se aprecia un cambio importante en el funcionamiento hidroquímico del acuífero, con un gradiente desde las zonas más salinizadas de borde hacia los cursos fluviales principales. El gradiente es de orientación oeste-este, con acusadas inflexiones en torno a la cacera de Betaya, donde adquieren un acusado paralelismo con el arroyo de la Ermita.

– Distribución de isorrelaciones iónicas cloruro/bicarbonato



Esta relación iónica no presenta una distribución nítida ni coincidente con los rasgos conocidos del acuífero relativos a su funcionamiento hidrogeológico.

Se aprecian dos domos en el sector meridional, coincidentes con la cabecera del caz de recarga artificial y la cacera de aguas residuales de Santiuste, así como en la cabecera de la cacera de Betaya, corroborando la presencia de estructuras interpretadas como drenes que presentan anomalías con todas las cartografías de isorrelaciones empleadas en la zona del Cuerno de la Revilla y del Sanchón, de orientación NE-SO.

En el sector septentrional se aprecia un valle en la zona del “*Pinar Nuevo*”, lo que puede resultar indicativo de una zona del acuífero con mayor presencia de un ambiente de elevada alcalinidad y dureza. Este hecho puede estar condicionado por la presencia de facies Cuestas a una profundidad muy escasa en el sector.

– Distribución de isorrelaciones iónicas sulfato/cloruro

La cartografía presenta una distribución atípica, confrontada en general con el funcionamiento del índice, lo que indica la presencia de irregularidades puntuales importantes en el acuífero que malogran el funcionamiento del índice.

El rasgo diferenciador más importante es la claridad para la subdivisión de la *Cubeta* en dos sectores, un sector meridional hasta la zona de la carretera de Villagonzalo a Coca, donde se aprecia una mineralización por envejecimiento “*normal*”, junto con pequeñas anomalías atribuibles a causas tectónicas; y el sector septentrional, con dos domos de carácter local asociados a zonas de mayor espesor del acuífero superficial que bien podrían tener relación con procesos contaminantes puntuales, puesto que las relaciones restantes no indican anomalías relevantes en estos sectores.

5.3.2.2. *Sondeos de profundidad comprendida entre 75 y 150 m*

Se incluyen en este grupo a los puntos ns.º 6, 12, 13 y 18 (notación RCH-99, Anexo 3.1.2).

- **Análisis estadístico multivariante**

Los **rangos térmicos** observados en las muestras de este grupo oscilan entre 15º C para el punto 13, y 21ºC en el 18, y una T.^a media de 17,5ºC.

Los valores de la **conductividad *in situ*** varían entre 400 µS/cm en los puntos n.º 6 y 13, y los 1.093 µS/cm en el punto n.º 12. La conductividad media es de 576,2 µS/cm.

La **conductividad** obtenida en el análisis de **laboratorio** oscila entre los valores de 358 µS/cm del punto n.º 6 y 1.563 µS/cm (mismo punto que *in situ*). La media de los valores cuantificados en el laboratorio es de 941,2 µS/cm, superior a la obtenida en campo al igual que en las captaciones más someras.

En cuanto a la determinación del **pH *in situ***, el rango oscila entre los valores de 9.1 para el punto n.º 6, y de 10.7 para el punto n.º 13, lo que corresponde a unas facies neutras a muy básicas. La media de los valores cuantificados en el campo es de 9,6.

El **pH** obtenido en el **laboratorio** oscila entre los valores de 7,7 para los puntos ns.º 12 y 18, y de 9.4 en el punto n.º 6. La media de los valores cuantificados es de 8.5, valor algo inferior al obtenido en campo.

Del análisis químico de macroconstituyentes se han obtenido estos resultados:

mg/l⇒	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃
Min.⇒ (n.º pto.)	74 (18)	0.1 (6)	2 (13)	1 (13,6)	14 (6)	11 (6)	0 (12,18)	142 (6)	6.5 (6)
Máx.⇒ (n.º pto.)	93 (6)	7 (18)	127 (18)	68 (18)	156 (12)	65 (18)	18 (6)	338 (18)	284 (18)
media	82.5	2.02	59.5	40.2	80.5	27.7	5.7	80.5	138.6

Tabla 3.29. Captaciones de 75 a 150 m de profundidad. Fase preoperacional. Análisis estadístico de los resultados analíticos. Fase preoperacional. Captaciones de 75 a 150 m de profundidad.

Los valores de sodio son abundantes, especialmente con respecto a los restantes iones. Las concentraciones máximas aparecen en las muestras 6 y 13. Sobreponiendo la cobertura de “posición de los puntos de la RCH” al “mapa de isopacas” obtenido a partir de la interpretación de la campaña de prospección geofísica, se detecta que los valores máximos de sodio se ubican en el depocentro de las “cubetas” o paleorrelieves rellenos de un espesor de arenas eólicas muy superior al de las zonas restantes. Este alto contenido en sodio y la naturaleza de las facies induce a pensar en la vinculación de las facies bicarbonatadas sódicas con el flujo más profundo de acuerdo con un modelo conceptual de *Tóth* a escala regional.

La sodificación de esta agua es media. Son aptas para el regadío aunque hay especies que tolerarían mal esta concentración.

Los restantes iones alcalinos y alcalino-térreos son por lo general escasos. Hay un aumento considerable de calcio en el sondeo 18, cerca del trazado de la cacera de aguas residuales de Santiuste. La baja concentración de estos iones es acorde con la litología arcillo-margosa con escasas intercalaciones carbonatadas en forma de lentes hasta los 75 m de profundidad.

En cuanto a los aniones, hay una concentración en especial en las inmediaciones de la cacera (punto 18) y en el sector sur del área de estudio.

En este intervalo de profundidades hay una muestra con elevadas concentraciones de carbonatos (n.º 6), al parecer por presentar elevadas concentraciones de calcita y dolomita en disolución.

En cuanto a los nitratos, las concentraciones resultan bajas, excepto en el punto 18, sondeo que presenta signos inequívocos de contaminación puntual conservativa.

Junto con estos datos se han calculado las matrices de correlación entre una serie de parámetros preestablecidos, que son los iones macroconstituyentes, conductividad y pH de las cuatro alícuotas. Estas matrices permiten calcular el coeficiente de correlación entre los distintos elementos, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión (Tablas 3.30 a 3.33):

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var (%)
Na	0.0	86.0	53.333	46.576	87.33	100.0
Ca	2.0	127.0	75.333	65.256	86.623	98.0
Mg	1.0	91.0	53.333	46.758	87.672	99.0
Cl	16.0	156.0	102.667	75.719	73.752	90.0
SO4	17.0	65.0	33.333	27.429	82.286	74.0
pH	7.7	9.1	8.167	0.808	9.897	15.0
Cond	375.0	1563.0	1135.667	660.431	58.154	76.0
K	0.3	7.0	2.667	3.758	140.929	96.0
NO3	11.0	284.0	182.667	149.474	81.829	96.0
HCO3	168.0	397.0	301.0	118.899	39.501	58.0

Tabla 3.30. Fase preoperacional. Captaciones de 75 a 150 m de profundidad. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3	NO3
NA	1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
CA		1.0	0.887	0.934	0.672	-0.973	0.954	0.723	0.886	0.992
MG			1.0	0.993	0.254	-0.969	0.984	0.322	1.0	0.939
CL				1.0	0.364	-0.991	0.998	0.43	0.993	0.972
SO4					1.0	-0.484	0.421	0.997	0.252	0.572
PH						1.0	-0.997	-0.545	-0.969	-0.995
Cond							1.0	0.484	0.984	0.985
K								1.0	0.32	0.629
HCO3									1.0	0.938
NO3										1.0

Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3	NO3
NA	1.0	897.83	481.17	876.0	354.83	-0.933	8.2E+3	48.32	1.4E+3	2.0E+3
CA		1.0	5.46	20.99	12.05	9.07	408.01	-0.472	179.42	11.52
MG			1.0	16.88	25.38	9.06	394.17	1.28	165.38	22.65
CL				1.0	19.78	9.25	241.87	0.476	140.91	-14.37
SO4					1.0	8.64	798.07	-1.89	264.6	78.72
PH						1.0	7.8E+3	23.37	1.5E+3	1.7E+3
Cond							1.0	-0.463	99.83	-70.43
K								1.0	273.97	115.92
HCO3									1.0	-172.19
NO3										1.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3	NO3
NA	0.0	-10.42	-5.58	-10.0	-3.92	0.117	-91.17	-0.558	-14.17	-22.75
CA		0.0	0.635	1.08	0.283	-1.2E-2	9.66	4.2E-2	1.61	2.27
MG			0.0	1.61	0.149	-1.7E-2	13.9	2.6E-2	2.54	3.0
CL				0.0	0.132	-1.1E-2	8.71	2.1E-2	1.56	1.92
SO4					0.0	-1.4E-2	10.13	0.137	1.09	3.12
PH						0.0	-815.0	-2.54	-142.5	-183.93
Cond							0.0	2.8E-3	0.177	0.223
K								0.0	10.14	25.03
HCO3									0.0	1.18
NO3										0.0

Tabla 3.31. a 3.33. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l. Dada la escasez de muestras, se ha omitido el cálculo en meq/l.



- **Clasificaciones de aguas**

En cuanto a las facies hidroquímicas, la dominante es la bicarbonatada sódica con 2 muestras, luego la bicarbonatada cálcico-magnésicas y la bicarbonatada magnésico-cálcica con una muestra cada una.

- **Cartografías de isocontenidos e isorrelaciones**

Dado que tan solo han sido analizadas cuatro muestras para este intervalo de profundidades, carece de sentido elaborar mapas de isolíneas que puedan aportar información suficientemente fiable, no obstante, para caracterizar lo mejor posible la zona de estudio y la calidad hidroquímica de sus aguas.

- **Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas**

A partir de la representación en un diagrama de Piper de estas muestras, se observa que no es apropiado establecer una composición representativa para captaciones de este intervalo de profundidad. A pesar de los indicios de contaminación detectados, la muestra de composición más próxima a la media sería la número 18 (Fig. 3.30).

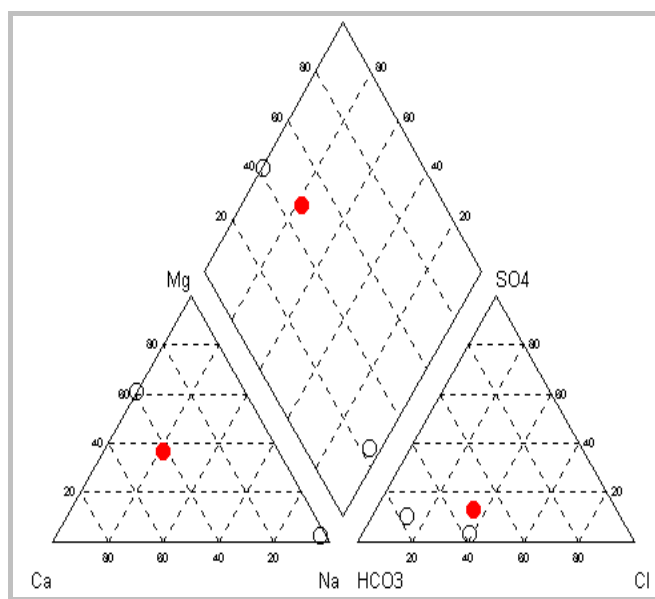


Fig. 3.30. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad entre 75 y 150 m.

5.3.2.3. Sondeos profundos de más de 150 m

Corresponden a este grupo los puntos RCH₉₉ ns.º 2, 5, 7, y 26.

- **Análisis estadístico multivariante**

La **temperatura** medida *in situ* de la muestra oscila entre los 19°C para el punto 2 y 22°C en el 5. La temperatura media es de 20,25°C. Si la temperatura media anual es de 12,9°C, se deduce que las muestras de estos sondeos son termales. Según criterios de termalidad, también lo serían las muestras de los sondeos 12 y 18, aunque dado que el muestreo fue realizado con una temperatura ambiente por encima de 30°C con termómetro de mercurio y mezcla de aguas, las valoraciones podrían estar sobreestimadas.

Los valores de la **conductividad** medida *in situ* varían entre 410 µS/cm del punto n.º 26, y 840 µS/cm del punto n.º 2. La conductividad media es de 570 µS/cm.

La **conductividad** obtenida en el análisis de **laboratorio** oscila entre los valores de 412 y 800 µS/cm de los mismos puntos que *in situ* el 26 y el 2 respectivamente. La media de los valores cuantificados en el laboratorio es de 561,25 µS/cm, prácticamente igual a la obtenida en campo.

En cuanto a la determinación del **pH in situ**, el rango oscila entre los valores de 7,6 para el punto n.º 2, y 8,85 para el punto n.º 26, lo que corresponde a unas facies básicas. La media de los valores cuantificados en el campo es de 8,23.

El **pH** obtenido en el **laboratorio** oscila entre los valores de 7,5 y 8,5 en los mismos puntos que los medidos *in situ*. La media de los valores cuantificados es de 8, valor ligeramente inferior al obtenido en campo.

Del análisis químico de macroconstituyentes se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 3.34):

mg/l⇒	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃
Min.⇒ (n.º pto.)	72 (26)	1,1 (5)	14 (26)	1,9 (7)	16 (7)	2 (7)	0 (2,7)	174 (26)	2,4 (7)
Máx.⇒ (n.º pto.)	133 (2)	8,9 (7)	29 (2)	13 (2)	40 (2)	64 (2)	7 (26)	324 (7)	89 (2)
media	95	3,6	21,2	8,4	27,7	24,75	2,7	235,5	40,3

Tabla 3.34. Análisis estadístico de los resultados analíticos. Fase preoperacional (1999). Captaciones de profundidad superior a 150 m.

El sodio y los bicarbonatos son los elementos claramente mayoritarios, con poca representación de otros iones. Son aguas de flujo profundo, termales y de salinidad moderada. Su carácter es ligeramente más ácido que en las restantes captaciones.

Es de destacar la concentración de nitratos en el sondeo profundo n.º 2, debido al fuerte abonado en la zona y al “efecto reciclaje”, por infiltración de aguas del acuífero más superficial hacia el profundo. Esto es debido a que el sondeo se encuentra ranurado en toda su columna de entubación, sin ningún aislamiento o cementación en el emboquille superficial. También parece haber quedado “colgado” el acuífero superior, desprendiéndose hacia niveles más profundos una cantidad de agua fuertemente nitrificada que además representa una detracción considerable al acuífero superficial. La conductividad de la muestra, por debajo de la media, indica la importancia que tiene en las



inmediaciones de Villeguillo la contaminación por nitratos, aunque los valores máximos se dispongan en la mitad sur del área de estudio, donde las conductividades también son más altas.

En este intervalo de profundidades hay dos muestras con presencia de carbonatos (ns.º 5 y 26), por contener concentraciones de calcita y dolomita en disolución. Las matrices de correlación para los sondeos profundos en fase preoperacional se presentan como Tablas 3.35 a 3.38 (mg/l).

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var (%)
Na	72.0	133.0	95.0	27.483	28.93	46.0
Ca	14.0	29.0	21.25	6.344	29.855	52.0
Mg	1.9	13.0	8.425	5.129	60.881	85.0
Cl	16.0	40.0	27.75	9.878	35.598	60.0
SO4	2.0	64.0	24.75	27.415	110.768	97.0
pH	7.5	8.5	7.95	0.48	6.032	12.0
Cond	412.0	800.0	561.25	167.717	29.883	48.0
K	1.1	8.9	3.65	3.554	97.366	88.0
HCO3	174.0	324.0	235.5	73.51	31.214	46.0
NO3	2.4	89.0	40.325	40.53	100.507	97.0

Tabla 3.35. Fase preoperacional (1999). Captaciones de profundidad superior a 150 m. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coefficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3	NO3
NA	1.0	0.816	0.251	0.544	0.8	-0.878	0.985	0.177	0.633	0.637
CA		1.0	0.219	0.581	0.863	-0.685	0.896	-0.184	0.282	0.907
MG			1.0	0.921	0.672	0.242	0.313	-0.746	-0.488	0.545
CL				1.0	0.906	-8.1E-2	0.625	-0.685	-0.282	0.812
SO4					1.0	-0.455	0.877	-0.448	4.5E-2	0.935
PH						1.0	-0.825	-0.569	-0.892	-0.34
Cond							1.0	3.2E-2	0.517	0.758
K								1.0	0.872	-0.575
HCO3									1.0	-0.121
NO3										1.0

Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3	NO3
NA	1.0	3.35	3.97	9.18	-51.09	9.4	-9.88	1.47	74.6	-48.85
CA		1.0	4.66	8.52	-54.49	9.05	57.81	5.84	166.07	-82.79
MG			1.0	12.8	-5.49	7.76	474.97	8.01	294.42	4.05
CL				1.0	-44.99	8.06	266.71	10.49	293.75	-52.14
SO4					1.0	8.15	428.49	5.09	232.52	6.13
PH						1.0	2.9E+3	37.18	1.3E+3	268.97
Cond							1.0	3.26	108.34	-62.52
K								1.0	169.64	64.25
HCO3									1.0	55.98
NO3										1.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3	NO3
NA	0.0	0.188	4.7E-2	0.195	0.798	-1.5E-2	6.01	2.3E-2	1.69	0.939
CA		0.0	0.177	0.905	3.73	-5.2E-2	23.69	-0.103	3.27	5.79
MG			0.0	1.77	3.59	2.3E-2	10.24	-0.517	-6.99	4.31
CL				0.0	2.51	-3.9E-3	10.61	-0.246	-2.1	3.33
SO4					0.0	-8.0E-3	5.36	-5.8E-2	0.12	1.38
PH						0.0	-288.62	-4.22	-136.67	-28.76
Cond							0.0	6.9E-4	0.227	0.183
K								0.0	18.04	-6.56
HCO3									0.0	-6.6E-2
NO3										0.0

Tabla 3.36 a 3.38. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.



En cuanto al **oxígeno disuelto** (sólo medido en campo) hay un rango de variación importante dependiendo del procedimiento de la toma. Las muestras extraídas por bombeo han sido batidas y oxigenadas, presentando valores por encima de 10 mg/l. Las muestreadas con hidrocaptor presentan valores más acordes con lo esperado. En general el rango de variación oscila entre 4,2 mg/l en el punto n.º 10 (pozo somero con fenómenos de eutrofización y consumo de oxígeno por reacciones de oxidación en el seno del agua) y 12 mg/l del punto n.º 22 (pozo somero cuya muestra fue obtenida por bombeo). La media aritmética es de 7,79 mg/l.

Los sondeos intermedios y profundos cuya muestra ha sido extraída por bombeo presentan niveles de oxigenación por debajo de las muestras de captaciones más someras. Este hecho induce a pensar que la cantidad de oxígeno que se agrega al agua como soluto durante el bombeo oscila entre límites estrechos. De este modo las muestras de los sondeos intermedios tienen valores de 6 mg/l para el punto 18 (obtenido con tomamuestras) y en torno a 9 mg/l para los obtenidos por bombeo, lo que representa un aumento medio de 3 mg/l, siendo el primer valor el más representativo. Los sondeos profundos tienen valores que oscilan entre 5,2 mg/l (punto 7) y 9,5 (punto 2). La dispersión de los valores es algo mayor como lo es el tiempo de bombeo, estando entre 5 y 6 mg/l el valor más adecuado para estas captaciones.

Los pozos suelen presentar valores inferiores a los cuantificados en los sondeos. Si el agua obtiene el oxígeno directamente del aire atmosférico, estos valores constituyen un signo evidente de contaminación y de procesos con demanda química y bioquímica de oxígeno. Los sondeos en desuso presentan en general los valores mínimos de oxígeno disuelto.

El ácido sulfhídrico (medido en todos los puntos) queda por debajo de la precisión mínima del kit de reactivos empleado (0,1 mg/l). No se han detectado concentraciones por encima de la precisión mínima del Kit ni siquiera en los sondeos con procesos de termalismo. Tampoco procesos de reducción de sulfatos destacables, excepto en los sondeos más profundos.

- **Clasificaciones de aguas**

En cuanto a las facies, la única existente es la bicarbonatada sódica, característica de las aguas de flujo profundo y circulación regional.

- **Cartografías de isocontenidos e isorrelaciones**

Al haber sido analizadas tan sólo cuatro muestras para este intervalo de profundidades, se considera poco efectivo elaborar mapas de isolíneas.

- **Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas**

De acuerdo con su quimismo, estas facies pueden ser agrupadas en una “familia” cuya principal característica es ser aguas maduras y muy evolucionadas, de circulación



regional, tiempos de residencia en el acuífero elevados y procedencia profunda como atestigua su carácter termal. Esta similitud se hace patente observando el siguiente diagrama de Piper-Hill-Langelier (Fig. 3.31).

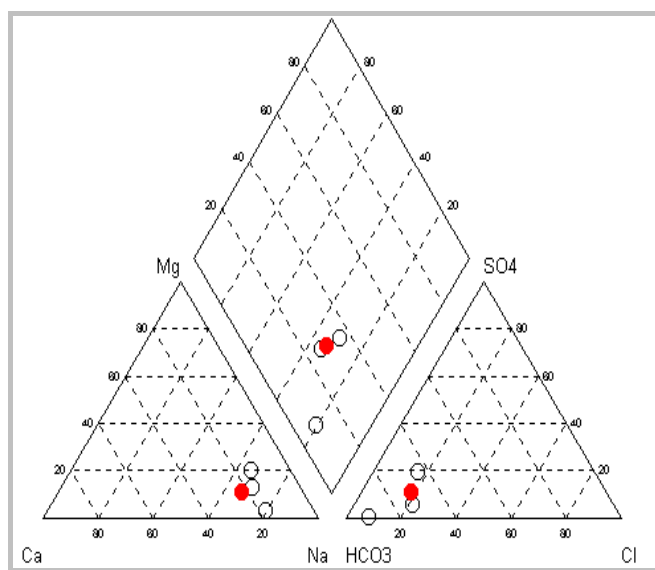


Fig. 3.31. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas tomadas en captaciones de profundidad superior a 150 m.

El punto más representativo por presentar una analítica cercana al promedio de todos los análisis es el n.º 5 (sombreado).

• Cálculo de índices agrícolas

En vista del aprovechamiento del agua previsto, se ha calculado una serie de índices agrícolas que determinan su idoneidad para el riego, tales como:

– Conductividad (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) junto con el grupo de salinización correspondiente dentro de un diagrama **RAS-conductividad** (USEPA, 1992).

– **Relación de absorción de sodio [RAS (=SAR)]**

Calculada a partir de la aplicación de la fórmula:

$$S. A. R. = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa + rMg}{2}}} \quad (r=\text{meq/l})$$

En cuanto a los valores calculados, el índice SAR (=RAS), indica la cantidad de sodio en el agua que podrá ser absorbida por el suelo y buen indicador de la calidad del agua para riego, se ajusta fielmente a la profundidad de las captaciones. En todos los

sondeos de profundidad superior a 75 m presenta valores por encima de 3 (aguas con salinidades medias y altas por lo general del grupo C), a excepción del n.º 18, sondeo nulo y abandonado que fue perforado en un banco de arcillas. Su baja concentración relativa de sodio es atribuible al intercambio selectivo de las arcillas por potasio, cuyo valor (0,17) se encuentra bastante por encima de la media, y a la presencia de niveles calcificados con calcio y magnesio que minimizan al índice SAR. En todas las captaciones que extraen agua del acuífero superficial el índice SAR queda por debajo de 2, y no presentan riesgo de sodificación del suelo por regadío.

– Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

Las directrices de toxicidad para el regadío de la FAO-UNESCO (FAO, 1987), utilizan el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) para evaluar la tolerancia de los cultivos, distinguiendo tres grupos (Tabla 3.39):

SENSIBLES	PSI<15
SEMITOLERANTES	15<PSI<40
TOLERANTES	PSI>40

Tabla 3.39. Rangos de toxicidad por PSI de las aguas de riego según la FAO (en UNESCO, 1971).

– Riesgo de magnesificación (MH)

En general es alto en las muestras superficiales y menos en las de sondeos intermedios y profundos.

• Comparación entre las muestras de agua

Se han efectuado comparaciones entre todas las alícuotas muestreadas y un tratamiento estadístico de los resultados analíticos.

Este se ha efectuado a partir de unas curvas de regresión entre distintos parámetros enfrentados. En concreto se han elegido: Sodio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, pH, potasio, bicarbonatos y nitratos. Los parámetros empleados han sido el coeficiente de correlación, la intersección con el eje Y, el cálculo de las pendientes de las distintas rectas de regresión para cada par de parámetros enfrentados. Con los resultados se han elaborado las “matrices de correlación” correspondientes.

El tratamiento estadístico de las muestras, considerando los parámetros Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, pH, HCO₃, NO₃ y K es el siguiente (Tablas 3.40 a 3.44):

LOCALIDAD	Índice	Coef Corr.	Distancia Euclidiana	Puntos usados para correlación
- SANTIUSTE.	10	0.988	31.255	9
- SANTIUSTE.	18	0.981	31.931	9
- SANTIUSTE.	9	0.981	20.982	9
- SANTIUSTE.	19	0.975	35.305	9
- SANTIUSTE.	5	0.971	105.895	9



- SANTIUSTE.	27	0.969	30.887	9
- SANTIUSTE.	23	0.968	45.094	9
- SANTIUSTE.	2	0.96	38.417	9
- SANTIUSTE.	28	0.957	28.849	9
- SANTIUSTE.	22	0.947	44.197	9
- SANTIUSTE.	26	0.945	48.923	9
- SANTIUSTE.	16	0.933	60.737	9
- SANTIUSTE.	14	0.925	57.7	9
- SANTIUSTE.	17	0.919	64.585	9
- SANTIUSTE.	4	0.914	49.821	9
- SANTIUSTE.	21	0.909	47.487	9
- SANTIUSTE.	8	0.905	42.81	9
- SANTIUSTE.	25	0.903	43.455	9
- SANTIUSTE.	12	0.897	70.558	9
- SANTIUSTE.	11	0.877	68.642	9
- SANTIUSTE.	6	0.875	73.534	8
- SANTIUSTE.	1	0.854	74.666	9
- SANTIUSTE.	15	0.846	73.157	9
- SANTIUSTE.	24	0.829	74.099	9
- SANTIUSTE.	20	0.792	82.316	9
- SANTIUSTE.	7	0.647	74.885	9
- SANTIUSTE.	13	0.493	91.748	9

Tabla 3.40. Parámetros estadísticos de la comparación entre las muestras de agua del período preoperacional. Concentración en mg/l.

	Mín	Máx	Promedio	St. Dev.	Dev. Coef.	Var%	Muestra N.º
Na	0.0	133.0	66.929	30.932	46.217	100.0	28
Ca	2.0	129.0	76.286	37.231	48.805	98.0	28
Mg	1.0	129.0	52.239	34.449	65.944	99.0	28
Cl	14.0	156.0	76.179	46.098	60.513	91.0	28
SO4	2.0	222.0	65.786	57.631	87.604	99.0	28
pH	7.2	9.4	7.775	0.505	6.498	23.0	28
Cond	358.0	2040.0	1041.259	428.035	41.107	82.0	27
K	0.1	12.0	3.282	3.243	98.818	99.0	28
HCO3	87.0	580.0	313.893	106.931	34.066	85.0	28
NO3	2.4	284.0	136.093	85.389	62.743	99.0	28

Tabla 3.41. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coefficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	K	HCO3	NO3
NA	1.0	-9.3E-2	0.107	0.241	0.134	0.321	0.208	0.366	-6.8E-2
CA		1.0	0.723	0.748	0.335	-0.541	0.342	0.667	0.786
MG			1.0	0.845	0.705	-0.377	0.251	0.802	0.63
CL				1.0	0.414	-0.311	0.222	0.69	0.711
SO4					1.0	-0.321	4.2E-2	0.465	0.248
PH						1.0	-0.16	-0.342	-0.453
K							1.0	0.473	0.174
HCO3								1.0	0.373
NO3									1.0

Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	K	HCO3	NO3
NA	1.0	84.03	41.9	47.28	48.76	7.38	1.72	214.96	145.71
CA		1.0	1.22	5.48	26.24	8.34	1.01	167.82	-1.35
MG			1.0	17.11	4.21	8.06	2.05	183.86	54.46
CL				1.0	26.33	8.03	2.09	191.96	35.76
SO4					1.0	7.96	3.13	257.12	111.88



PH	1.0	11.25	876.87	731.72
K		1.0	262.68	121.09
HCO ₃			1.0	42.57
NO ₃				1.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO ₄	PH	K	HCO ₃	NO ₃
NA	0.0	-0.123	0.128	0.374	0.271	5.8E-3	2.4E-2	1.38	-0.201
CA		0.0	0.669	0.927	0.518	-7.3E-3	3.0E-2	1.91	1.8
MG			0.0	1.13	1.18	-5.5E-3	2.4E-2	2.49	1.56
CL				0.0	0.518	-3.4E-3	1.6E-2	1.6	1.32
SO ₄					0.0	-2.8E-3	2.4E-3	0.863	0.368
PH						0.0	-1.02	-72.41	-76.61
K							0.0	15.6	4.57
HCO ₃								0.0	0.298
NO ₃									0.0

Tabla 3.42. a 3.44. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

5.3.2.4. Caracterización global. Fase preoperacional

A tenor de la caracterización del entorno preoperacional frente a las actuaciones de recarga artificial, cabe destacar los siguientes aspectos.

La calidad de las aguas subterráneas de la *Cubeta*, deducida del análisis de 28 alícuotas correspondientes a la red de control de la hidroquímica definida por el MAPA en 1999, está condicionada sobre todo por unos polos fríos relativamente salinizados con respecto a la situación de partida habitual, y a la influencia de numerosos rasgos específicos del sistema. Entre estos cabe destacar los procesos de interacción con facies de alto contenido en sílice y hierro (arenas eólicas). Influyen además en gran medida los depósitos evaporíticos margo-yesíferos que subyacen intercalados en la serie sedimentaria en algunos sectores, como es el occidental. Estos originan aguas cloruradas y sulfatadas de alta salinidad, por disolución directa de las sales presentes en el acuífero y por los grandes períodos de permanencia de las aguas en él debido a los largos recorridos de las aguas a través de él. A esto hay que añadir la importancia de procesos contaminantes directos, acumulativos y sinérgicos producto de actuaciones antrópicas.

La calidad del agua depende en gran medida de la ubicación y profundidad de los sondeos de captación, y por tanto, de la profundidad a la que se realizan las extracciones de dichas aguas.

Los procesos de deterioro cualitativo son extensos. Entre ellos cabe destacar los originados por salinización natural, por reciclaje de las aguas de riego, procesos de mezcla de aguas de captaciones superficiales y profundas y presencia de vectores contaminantes orgánicos en las aguas subterráneas (nitratos, nitritos, cloruros, fósforo, clorofila, etc.). A estos hay que añadir trazas nocivas como hierro, manganeso, y en menor proporción aunque mayor intensidad de impacto, derivados alquímicos del arsénico –arsenitos y arsenatos, ácido monometilarsónico (MMA), ácido dimetilarsínico (DMA)–, etc.

Para el caso de los pozos someros se ha comprobado que la temperatura de las muestras oscila entre 14 y 23°C siendo la T.^a media de 17,6°C en el verano de 1999. La conductividad medida *in situ* varía entre 300 µS/cm y 1.870 µS/cm, con una media de



949,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y las medidas de laboratorio oscilan entre 506 y 2.040 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pH oscila entre 8 y 9,6, con una media de 8,5.

Del análisis químico de macroconstituyentes cabe destacar que los valores en sodio y potasio son moderados en general (de 13 a 112 mg/l para el Na [promedio=59,3]) y de 0,5 a 12 mg/l para el K (promedio=3,5), excepto en captaciones localizadas en la inmediación de lagunas salinas fosilizadas, en zonas con indicios de contaminación y en zonas en las que se aprecian cubetas en el paleorrelieve.

También hay ligeras concentraciones en zonas en torno a sondeos profundos con altos caudales de extracción. Esta misma distribución presentan los sulfatos.

El contenido en calcio y magnesio es el característico de la interacción de aguas de baja mineralización con arenas silíceas.

Los sondeos de profundidad superior a 75 metros presentan mayor conductividad y alcalinidad. El contenido en nitratos oscila entre 2,4 y 89 mg/l, observándose las mayores concentraciones en los sondeos ubicados en zonas adyacentes a vertidos de aguas residuales y en sondeos cuyo diseño permite el descuelgue de agua desde el acuífero superior hacia el inferior a través de la misma captación.

La presencia de tritio (*CEDEX, 1996*) y nitratos en sondeos profundos corroboran el efecto reciclaje de las aguas de regadío y la interconexión entre acuíferos colgados a través de ciertas captaciones.

Aparece además sobresaturación en carbonato cálcico en dos de las muestras. Cuatro de las muestras analizadas presentan indicios para pensar que son aguas maduras y muy evolucionadas, de circulación regional, tiempos de residencia en el acuífero elevados y procedencia profunda, y el resto confirman la existencia de mezclas de aguas procedentes de distintos acuíferos en las captaciones.

En cuanto a las facies, la dominante es la bicarbonatada-cálcico-magnésica o magnésico-cálcicas con 13 muestras, luego las bicarbonatadas magnésicas con dos muestras, una bicarbonatada cálcica, un ejemplar único de facies bicarbonatada calco-sódica, otra facies bicarbonatada y clorurada magnésica y otra sulfatado-magnésica, confirmando la alta variabilidad y complejidad hidroquímica del sistema.

En el hidrograma de Piper-Hill-Langelier de la Fig. 3.32 se representan las muestras distribuidas de acuerdo con la profundidad de la captación de procedencia.

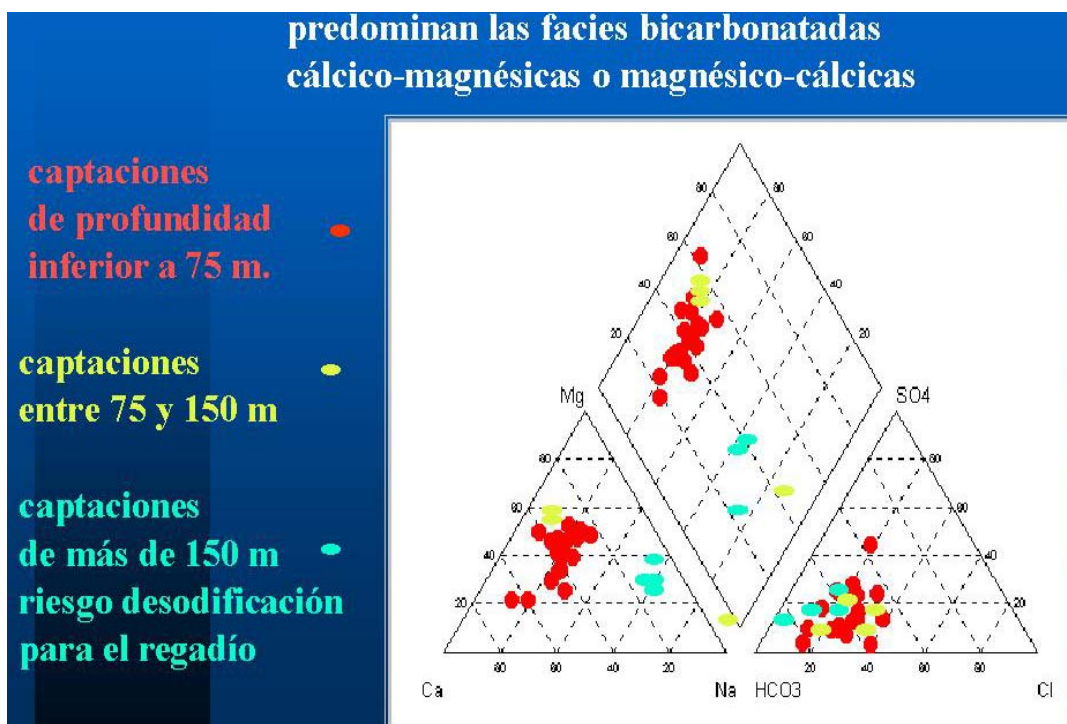


Fig. 3.32. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras analizadas (Fdez. Escalante, 2002b).

En esta etapa se han elaborado cartografías temáticas (mapas de isolíneas o isocontenidos) de la distribución de la conductividad del agua, ión Cl^- , ión NO_3^- , iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$) para los distintos acuíferos diferenciados en la vertical. Además para el acuífero superior se ha cartografiado la distribución de la concentración de los aniones CO_3H^- , Cl^- , SO_4^{--} y NO_3^- .

A estos hay que añadir el cálculo de isorrelaciones iónicas, en concreto la relación magnesio/calcio, potasio/sodio, cloruro/bicarbonato, sulfato/cloruro, sodio/calcio, sodio/cloruro, calcio/sulfato, calcio/magnesio, sodio/(calcio+magnesio), sulfato/calcio, relación cuadrática del calcio/bicarbonato, e índices químicos iónicos y de cambio de bases, y la elaboración de cartografías con los que han demostrado mayor efectividad para los fines previstos, que son las cuatro primeras.

Su empleo ha permitido diferenciar dos sectores en el acuífero claramente diferenciados, que coinciden con la diferenciación realizada en base a argumentos tectónicos. Estas herramientas indican también anomalías en las zonas bajo la influencia de drenes de orientación NE-SO, especialmente en la cabecera de la cacería de Betaya.

Se aprecia además zonas con mayor concentración salina y mayor alcalinidad en zonas de mayor espesor del acuífero cuaternario.

Hay además ciertas anomalías atribuibles a focos puntuales de contaminación.

Los diagramas utilizados en la caracterización han sido el de Stiff (integrando los diagramas en una cartografía georreferenciada), el de Piper y diagramas agrícolas tipo Wilcox y Riverside (USEPA, 1998).

También se han realizado estudios en relativo mediante diagramas de Scatter o de dispersión, confrontando iones tales como conductividad-cloruro, conductividad-sulfato, conductividad-nitrato, conductividad-bicarbonato+carbonato, conductividad-sodio, conductividad-sodio+potasio, conductividad-calcio y conductividad-magnesio. En ellos se observa que la mayor contribución a la salinidad del agua corresponde al anión CO_3H y la menor al ión $\text{SO}_4^{=}$. En cuanto a los cationes la pendiente mayor corresponde al sodio y la menor al potasio, siendo mayor para el magnesio que para el calcio.

Estas distribuciones indican la contribución relativa de los distintos iones a la conductividad del acuífero, lo que ha permitido diferenciar ciertos sectores de mayor alcalinidad y dureza en zonas con presencia de *facies Cuestas* a escasa profundidad, y mayor salinidad y concentración de nitratos y sodio en las cubetas del paleorrelieve correspondientes a zonas de gran espesor del acuífero.

5.3.3. Fase operacional (RCH-2003)

Para el estudio de este período simultáneo al primer ciclo de recarga artificial fueron seleccionados un total de 28 puntos del inventario de captaciones, distribuidos de forma homogénea por el territorio, y con cierto interés hidroquímico.

Estos puntos constituyen la denominada “nueva red de control de la hidroquímica” referida a fecha de 2003 (que en adelante se denominará como RCH 03). Esta tabla se presenta en el Anexo 3.1.2, y la numeración de las muestras queda referida a tal tabla.

Los criterios de selección con respecto a la red de 1999 fueron ligeramente modificados, dado que el inicio de las operaciones de recarga artificial conlleva un cambio en los objetivos perseguidos con el uso de la red de control. De este modo adquieren una mayor importancia las captaciones someras, en las que es previsible que se produzcan las mayores variaciones hidrogeoquímicas debido a la interacción con el agua de recarga. En estos 28 puntos está incorporado el “*polo frío SO*”.

Se ha restado además importancia al conocimiento de los escasos lentejones que configuran el “*acuífero intermedio*”, dado su carácter excesivamente zonal.

La nueva RCH mantiene 11 puntos comunes con la diseñada en el año 99, cuya equivalencia es (Tabla 3.45):

RCH 99	RCH 03
RCH 1	RCH 03-1
RCH 3	RCH 03-2
RCH 7	RCH 03-6
RCH 10	RCH 03-8
RCH 16	RCH 03-13
RCH 20	RCH 03-14
RCH 21	RCH 03-15
RCH 24	RCH 03-17
RCH 25	RCH 03-18
RCH 27	RCH 03-19
RCH 28	RCH 03-20

Tabla 3.45. Equivalencia entre las numeraciones de la RCH 1999 (red de control del período preoperacional) y RCH 03 (red del período operacional).

Del conjunto de puntos comunes entre ambas campañas, tan solo se ha mantenido un sondeo profundo, que es el RCH 7.

Los sondeos intermedios han sido sustituidos por puntos de control “*intermedios*” con objeto de concentrar los esfuerzos en la caracterización del acuífero superficial.

Un buen número de captaciones han sido sustituidas por puntos de control cercanos más apropiados para el fin previsto, si bien supuestamente sus características deben ser semejantes dada la cercanía geográfica entre las captaciones. La correspondencia es la siguiente (Tabla 3.46):

RCH 99	RCH 03
RCH 4	RCH 03-3
RCH 5	RCH 03-4
RCH 6	RCH 03-5
RCH 9	RCH 03-7
RCH 11	RCH 03-9
RCH 12	RCH 03-10
RCH 13	RCH 03-11
RCH 14	RCH 03-12
RCH 22	RCH 03-16

Tabla 3.46. Equivalencia entre las numeraciones de la RCH 1999 (red de control del período preoperacional) y de nuevas captaciones cercanas a las anteriores integradas en la RCH 03 (red del período operacional) de distinta profundidad.

Todas las muestras de la campaña actual a las que se hace referencia en la tabla anterior, corresponden a captaciones de profundidad inferior a 50 m, con lo que los puntos RCH 5, RCH 6, RCH 12 y RCH 13 de la campaña de 1999, correspondientes a sondeos profundos, han sido sustituidos por puntos de control más someros.

Algunos puntos de la RCH 99 no han podido ser muestreados por varios motivos (clausura de las captaciones, indicios de fuerte contaminación puntual, etc.). De este modo los puntos de la red de 1999 números 2, 8, 15, 17, 18, 19, 23 y 26 (los sondeos 2, 18 y 26 correspondían a captaciones profundas) han sido sustituidos en la red de 2003 por los números 22, 23, 24, 25, 26, y 27.

Conocida la profundidad a la que se encuentran los principales estratos productivos y de las captaciones que los atraviesan, la totalidad de los puntos ha sido dividida en dos grupos:

- **Captaciones de profundidad inferior a 50 m.** Estos puntos extraen agua del acuífero eólico y fluvial superficial y de ciertas lentes y vetas de escasa importancia y extensión, intercaladas en la serie detrítica margo-arcillosa que constituye el techo del acuífero terciario. De los 28 puntos de la red 25 se incluyen en este rango.
- **Captaciones de profundidad superior a 50 m.** En este rango de profundidades se encuentra una formación geológica potente de comportamiento acuífero o acuitardo, y naturaleza tobácea, detrítica y calcárea. En la nueva red de control hay tres captaciones correspondientes a este grupo, que son los puntos RCH 03-06, 22 y 23.

Los resultados analíticos se presentan en las tablas del Anexo 3.1.3.1. *Red de control de la hidroquímica, fase operacional (rch-2003), resultados analíticos*, con constancia de los datos de las captaciones, parámetros inestables cuantificados (Anexo 3.1.3.2) y análisis de laboratorio.

La posición de los puntos de ambas redes de control se presenta en las tablas del Anexo 3.1.2 y en todas las cartografías de isocontenidos del Anexo 3.1.3.4. *Cartografía temática, mapas de isocontenidos para el acuífero superficial.*

El tratamiento de los datos de esta red de control se ha realizado con el mismo criterio que para la red previa. Consta por tanto de los siguientes apartados:

- **Cálculo del balance iónico**

En la Tabla 3.47 aparece el listado de las muestras analizadas, así como los balances iónicos calculados.

RCH 03	Balance %
rch 03-1	-4,18%
rch 03-2	-0,80%
rch 03-3	0,42%
rch 03-4	4,62%
rch 03-5	10,10%
rch 03-6	-0,0906
rch 03-7	0,90%
rch 03-8	1,96%
rch 03-9	6,29%
rch 03-10	-1,35%
rch 03-11	1,88%
rch 03-12	-8,05%
rch 03-13	2,46%
rch 03-14	-1,18%
rch 03-15	6,33%
rch 03-16	3,51%
rch 03-17	1,88%
rch 03-18	2,44%
rch 03-19	-5,19%
rch 03-20	-5,77%
rch 03-21	2,70%
rch 03-22	-0,029
rch 03-23	-0,0199
rch 03-25	-5,49%
rch 03-26	5,80%
rch 03-27	11,28%

Sondeo de profundidad inferior a 50 m

Sondeo de profundidad superior a 50 m

Tabla 3.47. Balance iónico de las muestras analizadas.

El balance iónico calculado para todas las muestras es menor de 11,5 %, lo que indica que los resultados analíticos son fiables para los objetivos propuestos. Así mismo el valor de las “residuales” para la conductividad queda dentro del rango de aceptabilidad, por lo que no hay criterios que induzcan a pensar en errores importantes en la analítica.

- **Clasificaciones de aguas**

Utilizando la clasificación de Schoukarev-Slavinov, las facies dominantes basándose en su contenido aniónico, son bicarbonatadas “*sensu estricto*”, perteneciendo a este grupo 16 de las mismas. Además seis son bicarbonatadas sulfatadas y dos bicarbonatadas cloruradas.

Mientras que, atendiendo al contenido catiónico, dominan claramente las facies cálcico-magnésicas con contenidos variables en sodio. Las aguas de captaciones profundas (en negrita) son bicarbonatadas sódicas.

- Mg-Ca-HCO₃-SO₄
- Mg-Ca-HCO₃-NO₃
- Mg-Ca-HCO₃-SO₄
- Ca-Mg-HCO₃-NO₃
- Ca-Mg-Na-HCO₃-NO₃
- Na-HCO₃
- Mg-Ca-HCO₃-SO₄
- Mg-HCO₃-SO₄
- Mg-Ca-Na-HCO₃-S
- Ca-Mg-HCO₃-SO₄
- Mg-Ca-Na-HCO₃-N
- Mg-HCO₃-NO₃-SO₄
- Ca-Mg-Na-HCO₃-Cl
- Mg-Na-HCO₃-Cl
- Mg-Ca-Na-HCO₃-N
- Ca-Na-Mg-HCO₃
- Ca-Mg-HCO₃
- Ca-Mg-HCO₃-Cl
- Ca-HCO₃-NO₃
- Mg-Ca-Na-HCO₃-Cl
- Ca-Mg-Na-HCO₃
- Na-HCO₃
- Na-HCO₃-CO₃
- Na-Ca-Mg-HCO₃-S
- Ca-Mg-NO₃-HCO₃
- Na-Mg-Ca-HCO₃

Dado que en esta etapa fueron excluidos de la red de control los sondeos de profundidad intermedia con procesos de mezclas de aguas y escasa representatividad, las agrupaciones se han realizado por sondeos de profundidad inferior a 50 m (correspondientes al acuífero superficial y parte del acuitardo terciario), y de profundidad mayor de 50 m. En este grupo hay tres captaciones que penetran en el acuífero regional, cuyo nivel del agua en la zona de estudio oscila en torno a 55-60 m.

A continuación se va a aplicar el mismo procedimiento de caracterización sobre los nuevos grupos que para la etapa preoperacional.

5.3.3.1. Pozos, pozos-sondeo, minisondeos y sondeos de profundidad inferior a 50 m

- **Análisis estadístico multivariante**



Como punto de partida para el análisis estadístico multivariable, se han realizado agrupamientos por las similitudes físico-químicas de las muestras y discriminado aquellas con valores extremos, atendiendo a su ambiente hidrogeológico.

El rango de variabilidad de los principales parámetros inestables determinados se presenta en el Anexo 3.1.3.2. *Determinación de parámetros inestables*. Analizando estos valores, destacamos:

En cuanto a la **temperatura**, los rangos térmicos observados en las muestras de este grupo oscilan entre 7°C para el punto 19, y 13°C para el 4. La T.^a media es de 9,8°C (determinaciones para febrero de 2003). Estas mediciones pueden resultar infravaloradas debido a la fecha de medición, lo que ha impedido detectar procesos de termalismo. En el verano de 1999 la temperatura media del agua fue de 17,6°C.

Los valores de la **conductividad medida *in situ*** varía entre 390 µS/cm del punto n.º 19, y 1.760 µS/cm del punto n.º 8. La conductividad media es de 984,1 µS/cm, valor ligeramente superior a la media calculada en 1999 (949,4 µS/cm), si bien había captaciones de profundidad entre 50 y 75 m que inciden en esta diferencia estadística, es decir, la población no es idéntica en ambos tratamientos.

La **conductividad** obtenida en el análisis de **laboratorio** oscila entre los valores de 433 (punto n.º 27) y 2.210 µS/cm (punto 8 –valor similar al obtenido *in situ*–). La media de los valores cuantificados en el laboratorio es de 1.141,1 µS/cm, cifra superior a la obtenida en campo y algo superior a la obtenida en el análisis de los datos de 1999, donde el resultado fue de 1125,8 µS/cm.

En cuanto a la determinación del **pH *in situ***, el rango oscila entre el valor de 7 para el punto 26, y 8,71 para el punto n.º 12, lo que corresponde a unas facies ligeramente básicas. La media de los valores cuantificados en el campo es de 7,9 (valor ligeramente inferior a la media de 1999, que era de 8,5).

El **pH** obtenido en el **laboratorio** oscila entre los valores de 7,2, para el punto n.º 1, y 8,6, en el punto n.º 12. La media de los valores cuantificados es de 7,9, valor muy parecido al obtenido en campo. En general las aguas son más básicas que en el período preoperacional (el pH medio obtenido en laboratorio en la campaña de 1999 fue de 7,6).

El tratamiento estadístico de los análisis químicos de macroconstituyentes obtenido se resume a continuación (Tabla 3.48):

mg/l⇒	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃
Min.⇒ (n.º pto.)	12 (19)	2 (19)	31 (27)	7 (19)	20 (19)	11 (27)	17 (9 y 12)	112 (19)	3 (25)
Máx.⇒ (n.º pto.)	106 (8)	116 (8)	182 (4)	166 (8)	174 (8)	443 (8)	0 –	568 (8)	378 (26)
Media	59,4	15,4	88,5	63,9	75,9	123,25	–	323,8	133

Tabla 3.48. Análisis estadístico de los resultados analíticos. Fase operacional, 2003. Captaciones de profundidad inferior a 50 m.



Los valores de **sodio** son característicos de aguas medianamente sodificadas, en general aptas para el regadío. Una excepción la constituye el punto 8, asociado al sistema de humedales de Ciruelos de Coca, en cuyas inmediaciones se han detectado indicios de presencia de flujos ascendentes de escala regional. El promedio es prácticamente similar al de 1999 (etapa preoperacional frente a la recarga artificial), que era de 59,3. El punto 8 actual ha sido medido en ambas campañas.

Los valores de **potasio** son característicos de captaciones someras, exceptuando el punto 8. Este valor se ha incrementado considerablemente con respecto a 1999, en que la media fue de 3,5.

El contenido en **calcio y magnesio** es prácticamente similar que en el período preoperacional, tanto para el grupo de captaciones someras como para la totalidad de las captaciones (de 87,9 a 88,5 mg/l para el calcio, y de 63,3 a 63,9 mg/l para el magnesio). En general el calcio ha descendido ligeramente y aumentado el magnesio.

Los **cloruros** manifiestan un ligero descenso, de 84,6 a 75,9 ppm de media. En contraposición, los sulfatos en general presentan concentraciones muy superiores a las cuantificadas en la etapa previa (de 74,2 a 123,25 mg/l), si bien la presencia de un punto de mineralización especial ha disparado el valor máximo y aumentado la media proporcionalmente. En general hay sustitución de cloruros por sulfatos, como corresponde a un proceso de rejuvenecimiento de las aguas subterráneas.

Se han detectado dos captaciones con concentraciones importantes de **carbonatos** en las captaciones 9 y 12, correspondientes a captaciones del Pinar Nuevo y del sector Central de la *Cubeta*. Quedan ubicadas en lugares con anomalías hidroquímicas ya detectadas en 1999 con respecto a los ambientes hidroquímicos, si bien en ese período no se detectó concentración de carbonatos alguna en el sistema. En compensación la concentración en bicarbonatos ha descendido ligeramente (de 341 a 323,8 mg/l como promedio).

En cuanto a los **nitratos** hay una concentración máxima entre Ciruelos y Coca, así como en las inmediaciones de la cacería de Santiuste de San Juan Bautista. La presencia continua siendo importante, quedando constatadas concentraciones superiores a 100 mg/l incluso en zonas de pinar. El valor medio ha descendido ligeramente de 148,6 a 133 ppm entre 1999 (verano) y 2000 (invierno), lo que resulta indicativo, además de un ligero descenso, de que este ión está vinculado al control térmico y estacional de este parámetro.

La variación espacial de todos estos iones resulta fácilmente accesible a partir de la observación de los mapas de isolíneas isocoras (líneas que unen puntos de igual concentración en una determinada sustancia, ión, etc.). Estos mapas se presentan en el Anexo 3.1.3.4. *Cartografía temática. Mapas de isocontenidos*, para el acuífero superficial.

Para realizar el tratamiento estadístico multivariante más efectivo se han calculado las matrices de correlación para este grupo de muestras en mg/l (Tablas 3.49 a 3.52) y meq/l (Tablas 3.53 a 3.56).

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ	Coef. Var (%)
pH	7.2	8.0	7.514	7.797	103.757	10.0
Cond	540.0	2040.0	1075.9	435.578	40.485	74.0
Na	13.0	112.0	59.455	29.68	49.92	88.0
Cond	540.0	2040.0	1075.9	435.578	40.485	74.0
Ca	19.0	129.0	83.364	31.696	38.022	85.0
Mg	1.9	129.0	54.991	34.457	62.659	99.0
Cl	16.0	145.0	74.545	43.892	58.879	89.0
SO4	2.0	222.0	66.818	63.804	95.489	99.0
HCO3	147.0	580.0	335.273	108.781	32.445	75.0
NO3	2.4	283.0	131.564	89.148	67.76	99.0

Tabla 3.49. Captaciones de profundidad inferior a 50 m. Fase operacional, 2003. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	0.274	0.391	0.534	0.139	0.345	0.252	-1.1E-2	0.411	9.9E-2
Cond		1.0	0.593	0.498	0.737	0.953	0.854	0.905	0.827	0.524
Na			1.0	0.781	0.255	0.442	0.405	0.239	0.824	1.7E-2
K				1.0	0.194	0.468	0.389	0.144	0.68	0.163
Ca					1.0	0.685	0.77	0.319	0.434	0.692
Mg						1.0	0.852	0.721	0.728	0.486
Cl							1.0	0.538	0.569	0.47
SO4								1.0	0.391	0.27
HCO3									1.0	1.1E-3
NO3										1.0

Punto de corte con el eje Y:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	0.0	-2.4E+3	-298.36	-58.9	-52.65	-312.4	-267.26	88.9	-1.0E+3	-141.35
Cond		0.0	24.91	1.1	28.76	-27.85	-17.05	-79.28	162.2	7.44
Na			0.0	-0.743	67.17	24.45	38.97	36.33	155.77	128.55
K				0.0	74.94	32.84	51.07	54.22	233.6	111.61
Ca					0.0	-7.13	-14.4	13.31	211.13	-30.72
Mg						0.0	14.88	-6.61	208.89	62.36
Cl							0.0	8.47	230.16	60.45
SO4								0.0	290.71	106.33
HCO3									0.0	131.26
NO3										0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	464.4	47.25	8.48	17.96	48.52	45.14	-2.92	182.08	36.04
Cond		1.0	3.6E-2	4.4E-3	5.4E-2	7.8E-2	8.8E-2	0.129	0.178	0.112
Na			1.0	0.103	0.272	0.514	0.598	0.513	3.02	5.1E-2
K				1.0	1.57	4.14	4.38	2.35	18.99	3.73
Ca					1.0	0.745	1.07	0.642	1.49	1.95
Mg						1.0	1.09	1.34	2.3	1.26
Cl							1.0	0.783	1.41	0.954
SO4								1.0	0.667	0.378
HCO3									1.0	9.1E-4
NO3										1.0

Tabla 3.50. a 3.52. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

Tratamiento estadístico multivariante. Captaciones de profundidad inferior a 50 m. Fase operacional, 2003. Concentraciones expresadas en meq/l.

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var (%)
pH	7.2	8.0	7.514	7.797	103.757	10.0
Cond	540.0	2040.0	1075.9	435.578	40.485	74.0
Na	0.565	4.872	2.586	1.291	49.92	88.0



Cond	540.0	2040.0	1075.9	435.578	40.485	74.0
Ca	0.948	6.437	4.16	1.582	38.022	85.0
Mg	0.156	10.613	4.524	2.835	62.659	99.0
Cl	0.451	4.09	2.103	1.238	58.879	89.0
SO4	0.042	4.622	1.391	1.328	95.489	99.0
HCO3	2.41	9.507	5.496	1.783	32.445	75.0
NO3	0.039	4.564	2.122	1.438	67.76	99.0

Tabla 3.53. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Coefficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	0.274	0.391	0.534	0.139	0.345	0.252	-1.1E-2	0.411	9.9E-2
Cond		1.0	0.593	0.498	0.737	0.953	0.854	0.905	0.827	0.524
Na			1.0	0.781	0.255	0.442	0.405	0.239	0.824	1.7E-2
K				1.0	0.194	0.468	0.389	0.144	0.68	0.163
Ca					1.0	0.685	0.77	0.319	0.434	0.692
Mg						1.0	0.852	0.721	0.728	0.486
Cl							1.0	0.538	0.569	0.47
SO4								1.0	0.391	0.27
HCO3									1.0	1.1E-3
NO3										1.0

Punto de corte con el eje Y:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	0.0	-2.4E+3	-12.98	-1.51	-2.63	-25.7	-7.54	1.85	-17.11	-2.28
Cond		0.0	1.08	2.8E-2	1.44	-2.29	-0.481	-1.65	2.66	0.12
Na			0.0	-1.9E-2	3.35	2.01	1.1	0.756	2.55	2.07
K				0.0	3.74	2.7	1.44	1.13	3.83	1.8
Ca					0.0	-0.587	-0.406	0.277	3.46	-0.495
Mg						0.0	0.42	-0.138	3.42	1.01
Cl							0.0	0.176	3.77	0.975
SO4								0.0	4.77	1.71
HCO3									0.0	2.12
NO3										0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	pH	Cond	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	NO3
pH	1.0	464.4	2.06	0.217	0.896	3.99	1.27	-6.1E-2	2.98	0.581
Cond		1.0	1.6E-3	1.1E-4	2.7E-3	6.5E-3	2.5E-3	2.7E-3	2.9E-3	1.8E-3
Na			1.0	6.0E-2	0.312	0.972	0.388	0.245	1.14	1.9E-2
K				1.0	3.07	13.3	4.84	1.92	12.17	2.35
Ca					1.0	1.23	0.603	0.268	0.489	0.629
Mg						1.0	0.372	0.338	0.458	0.247
Cl							1.0	0.578	0.819	0.545
SO4								1.0	0.525	0.292
HCO3									1.0	9.0E-4
NO3										1.0

Tabla 3.54. a 3.56. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.

En general la correlación también es positiva y consistente, por tanto las variables parecen ser estocásticas, regionalizadas y presentan un grado de interdependencia.

La elaboración de hidrogramas de *Scatter* permitirá confirmar esta primera interpretación.



- **Índices hidrogeoquímicos**

Se ha realizado el cálculo de los mismos índices que para el período preoperacional. El resultado de los mismos se presenta en la Tabla 1 del Anexo 3.1.3.3. *Caracterización.*

El empleo de esta herramienta trabajando con ella “en relativo” presenta escasas variaciones con respecto al período previo, dado que los resultados analíticos varían entre límites estrechos.

Dado que uno de los principales objetivos es apreciar variaciones entre las etapas pre y operacional, se ha optado por emplear la técnica de los índices y relaciones iónicas “*en absoluto*”, estableciendo comparaciones entre cartografías de isocontenidos e isorrelaciones entre las dos etapas de estudio. La elaboración de cartografías específicas ha permitido aplicar esta técnica, según se describe en el próximo apartado.

- **Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas**

Los diagramas elegidos de nuevo han sido el de *Stiff* (para cada una de las muestras), el de *Piper-Hill-Langelier* y el de *Scatter*.

La representación en un hidrograma de *Piper-Hill-Langelier* de todas las muestras confirma la existencia de varias familias de muestras, de acuerdo con la profundidad de las captaciones del acuífero. De este modo las alícuotas 6, 22 y 23 quedan ubicadas en la zona de “*mineralización especial*” de facies bicarbonatadas sódicas, mientras que las restantes quedan ubicadas en el campo de las bicarbonatadas cálcicas y magnésicas (Fig. 3.33).

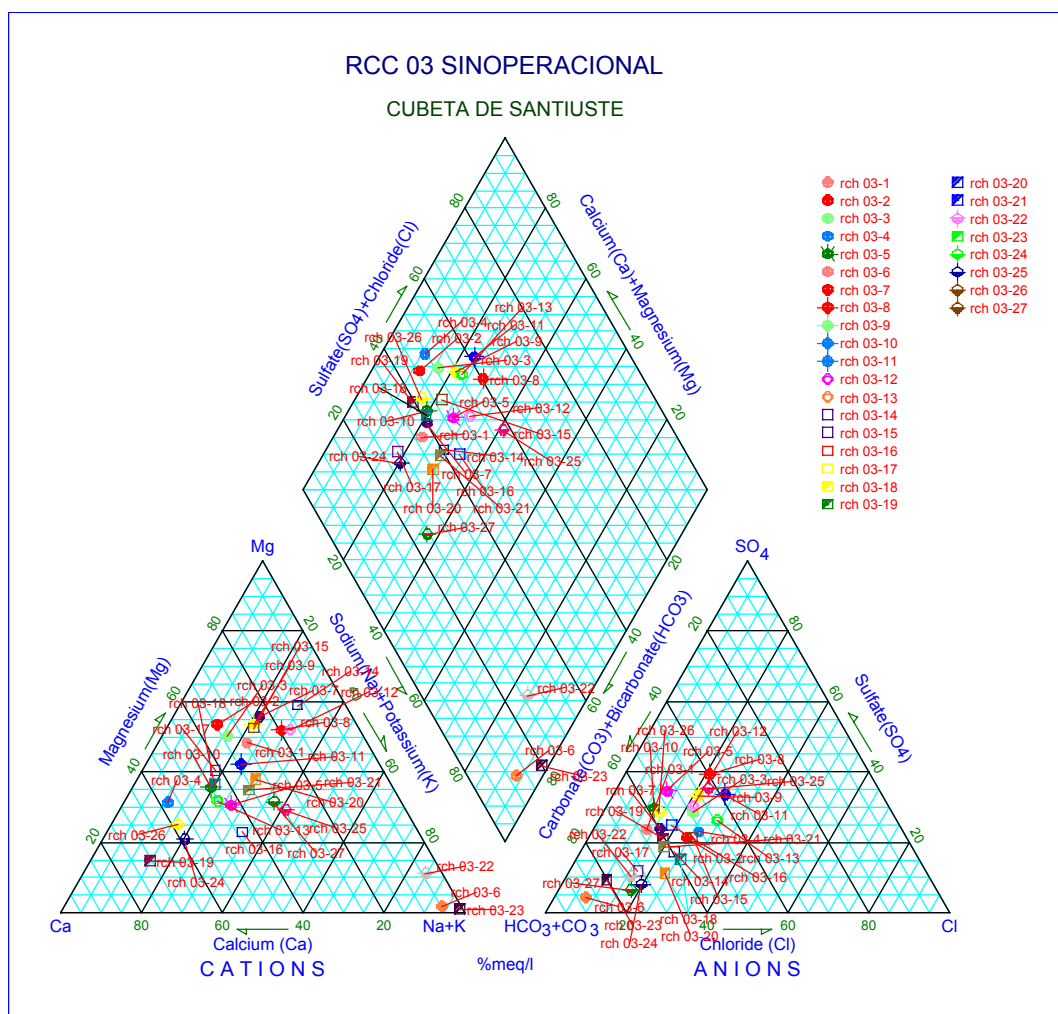


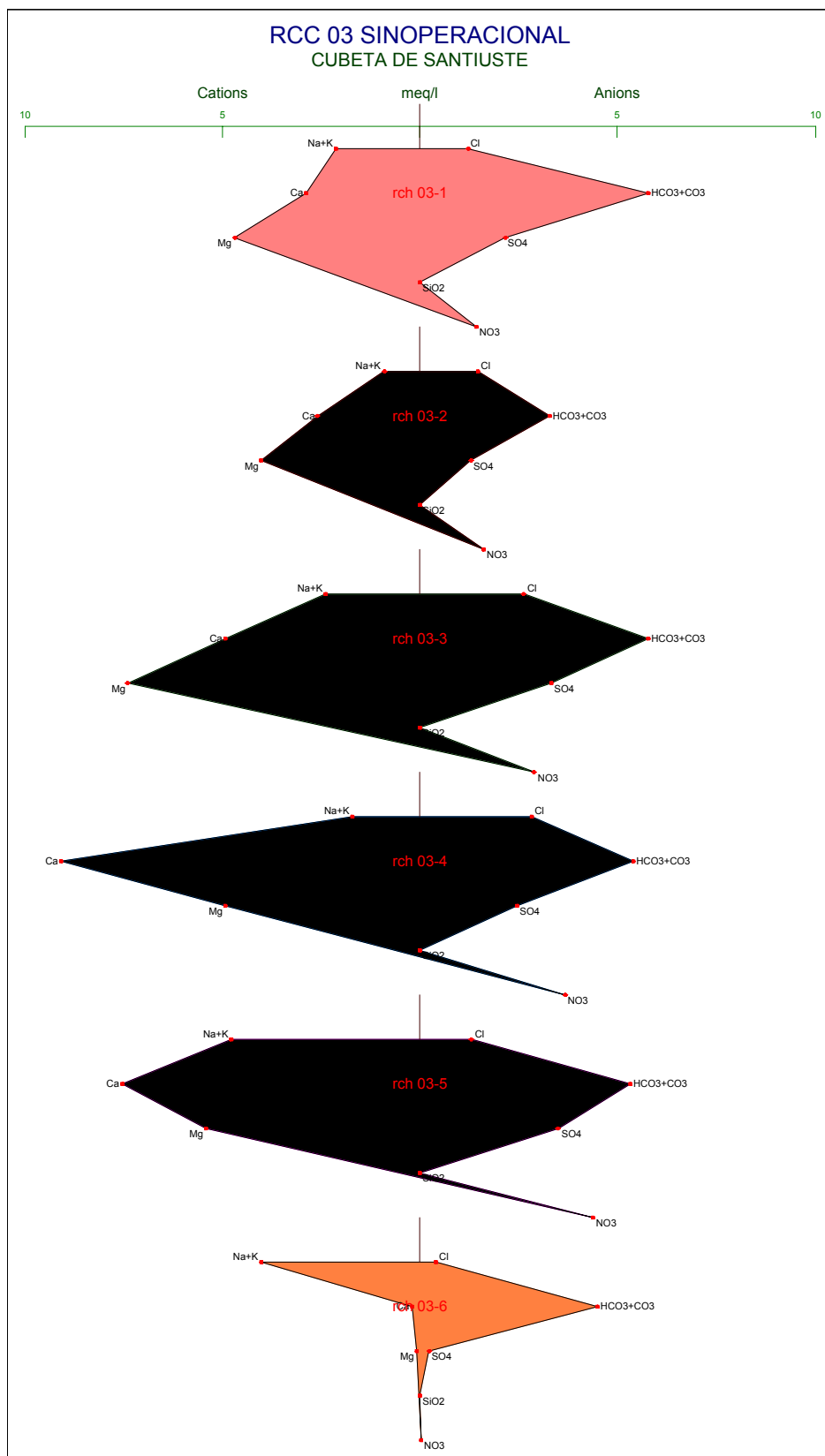
Fig. 3.33. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de todas las muestras de la RCH 03 (etapa operacional).

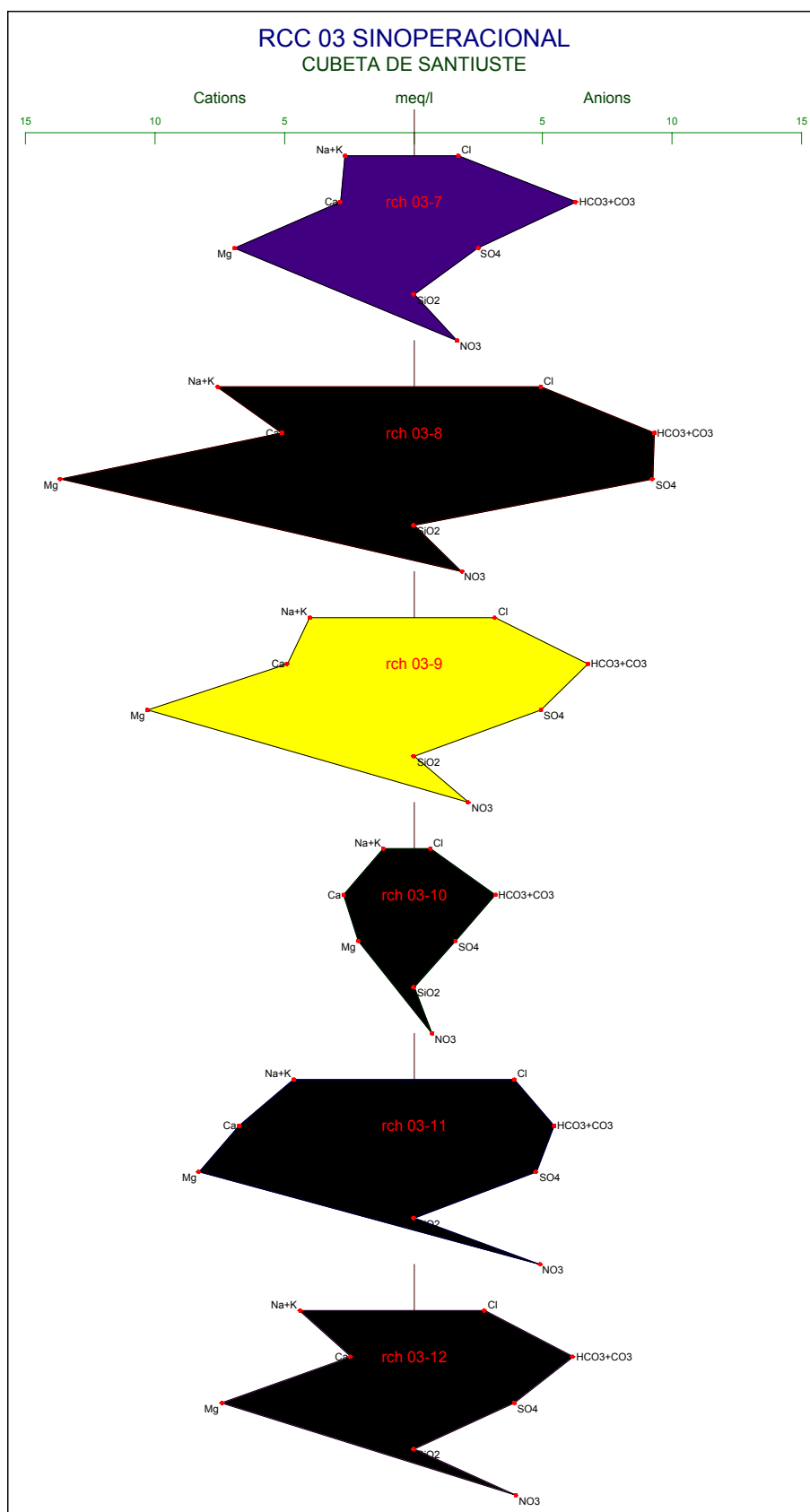
De acuerdo con su quimismo, estas facies corresponden a aguas jóvenes asociadas a un acuífero superficial de tiempos de residencia en el acuífero relativamente cortos. El hidrograma permite distinguir, además de las aguas sódicas correspondientes a los sondeos profundos, facies bicarbonatadas cálcicas y magnésicas y bicarbonatadas y sulfatadas cálcicas y magnésicas, lo que permite agrupar las muestras correspondientes a captaciones someras en tres “familias” por sus facies.

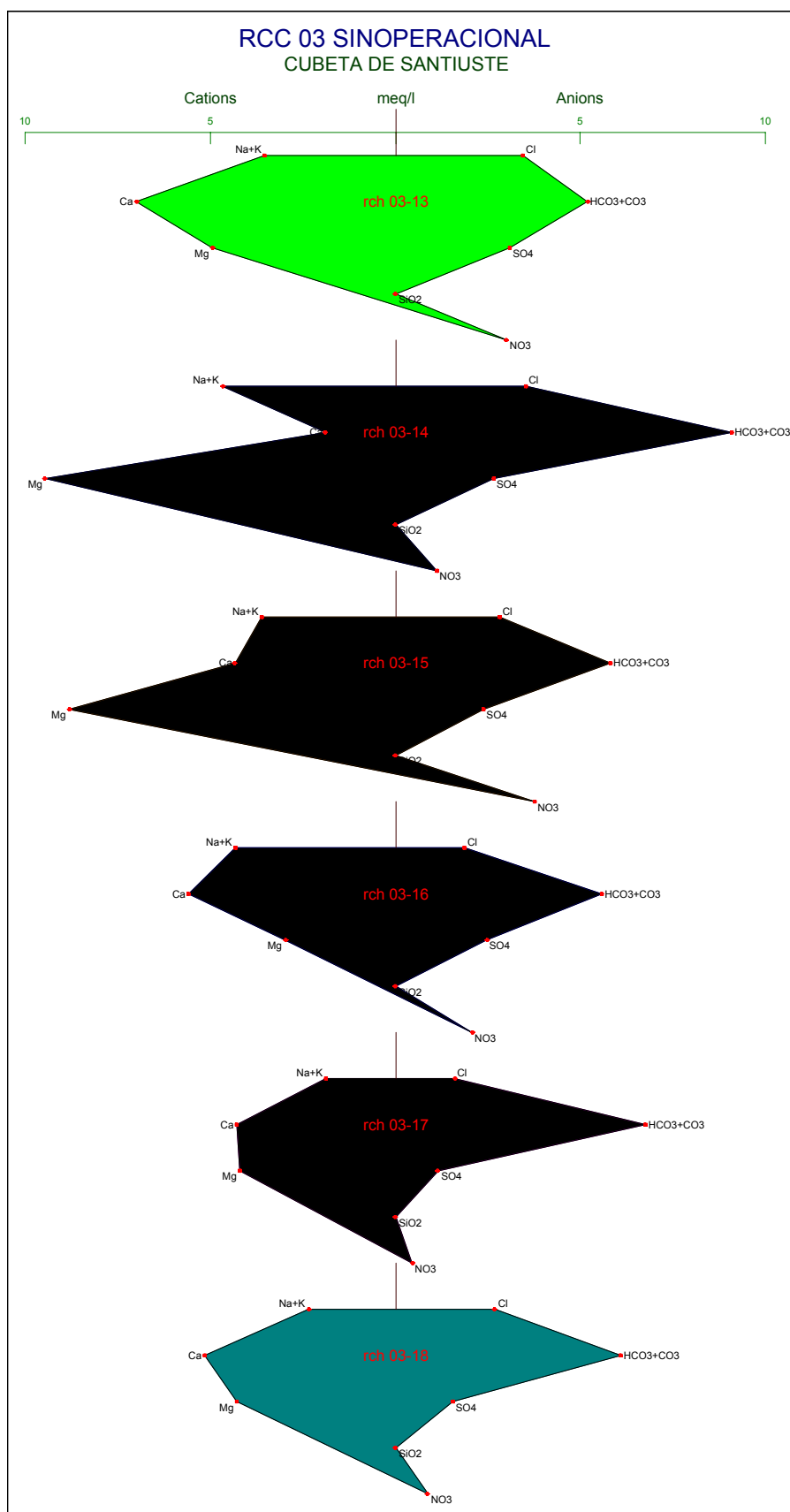
Los **diagramas de Stiff** permiten estudiar gráficamente la evolución hidroquímica de las aguas entre ambas etapas.

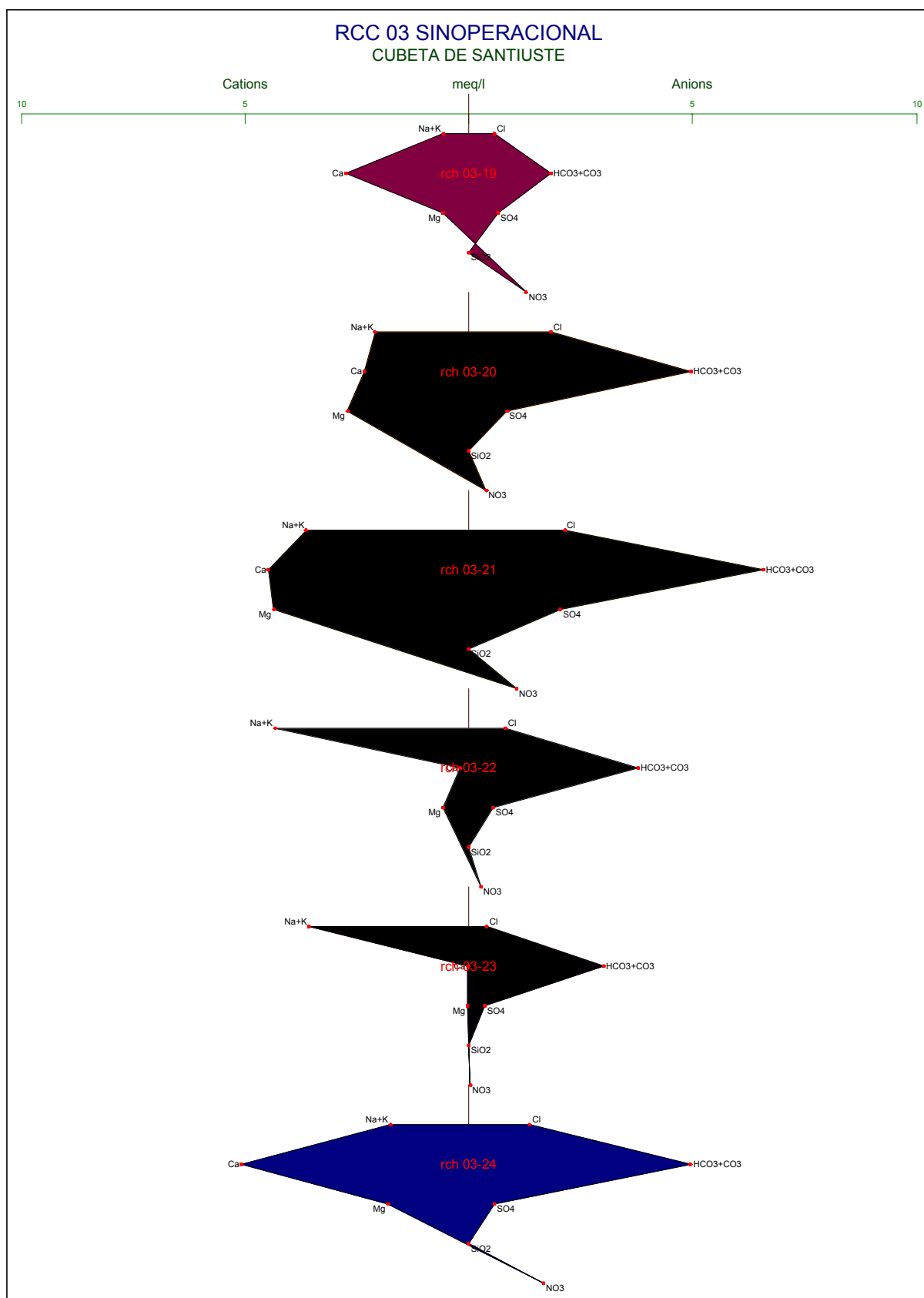
Los hidrogramas se presentan en las Figs. 3.34 a)-e). El número situado en la parte central de cada diagrama corresponde a número de punto perteneciente a la RCH₀₃.

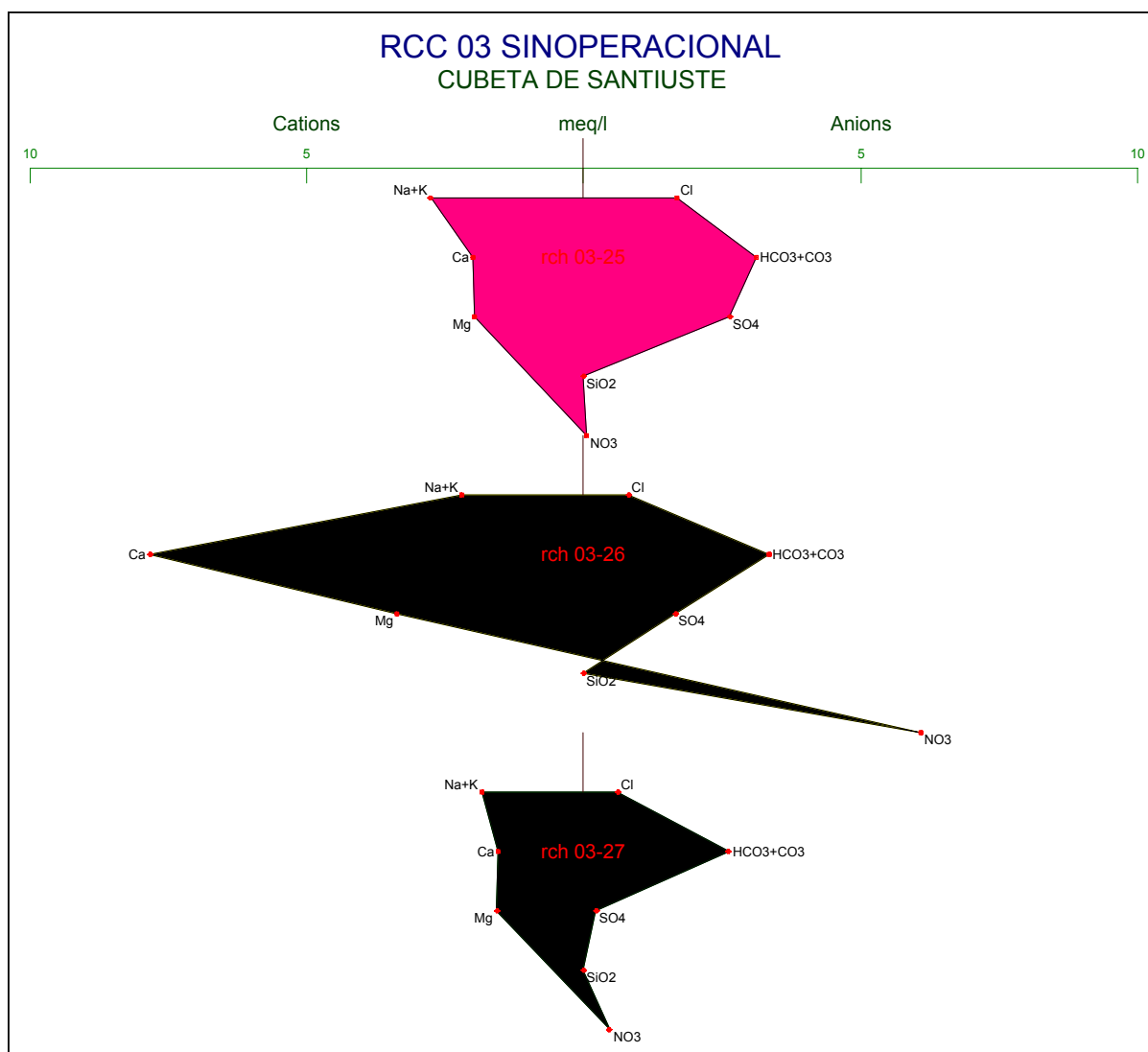
En general no se aprecian diferencias significativas a partir de la observación de los hidrogramas entre ambas fases.











Figs. 3.34 a) a e). Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff.

El **mapa de Stiff** se presenta como compendio de todos los mapas hidroquímicos anteriores. En una primera aproximación se aprecia que raramente se encuentran dos sondeos próximos que tengan una misma composición química.

Para este trabajo se ha diseñado un mapa específico (Fig. 3.35) donde constan los hidrogramas de Stiff para la fase preoperacional y sionoperacional, con objeto de poder contrastar la morfología y detectar cualquier tendencia evolutiva.

En dicho mapa se han identificado con polígonos amarillos los hidrogramas para las muestras del periodo preoperacional (1999) para el acuífero superficial, y en color rosado para el periodo operacional (2002). Los polígonos en color naranja o encarnado corresponden a sondeos profundos.

El principal inconveniente es que ambas redes no son idénticas, por tanto, no se puede deducir la tendencia evolutiva en la totalidad de los puntos, si bien, hay varios puntos adyacentes al caz de recarga artificial que presentan variaciones significativas. Entre estos cabe destacar la zona del Pinar Nuevo localizada al este de Ciruelos de coca, donde se aprecia un aumento significativo de sulfatos y magnesio, y una importante reducción de la concentración de nitratos en las aguas subterráneas.

En el sector Central la tendencia es similar, si bien hay un fuerte incremento de la presencia de sodio y potasio en las aguas subterráneas, especialmente en el sector occidental de la *Cubeta*.

En la zona del Sanchón, sector Central-Meridional, cabe destacar el ascenso en la concentración en cloruros, y bicarbonato cálcico, acompañado de un ligero descenso en iones alcalinos y nitratos.

En el sector Meridional de la *Cubeta* cabe destacar el incremento de sulfatos en las aguas subterráneas, con descenso en iones alcalinos y nitratos.

Fig. 3.35. Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff sobre una cartografía espacial de la zona de estudio (página siguiente).





Los **diagramas de Scatter** o de dispersión realizados han sido:

- Conductividad-cloruro.
- Conductividad-sulfato.
- Conductividad-nitrato.
- Conductividad-bicarbonato+carbonato.
- Conductividad-sodio.
- Conductividad-calcio.
- Conductividad-magnesio.

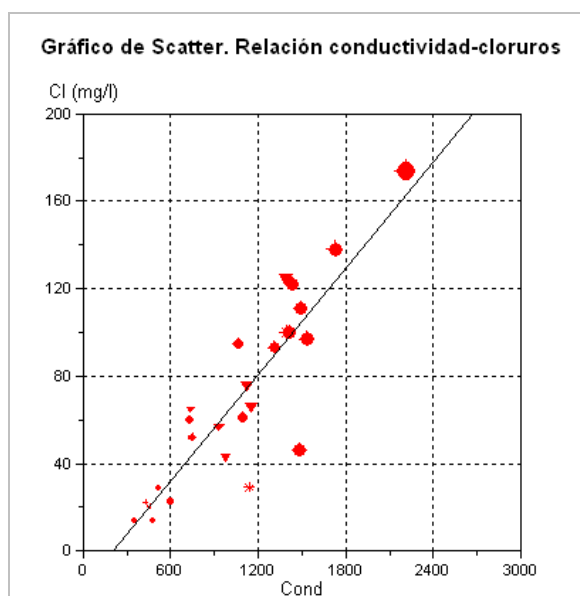


Fig. 3.36. Diagramas de Scatter para la confrontación del parámetro conductividad con algunos aniones y cationes mayoritarios Conductividad-cloruro.

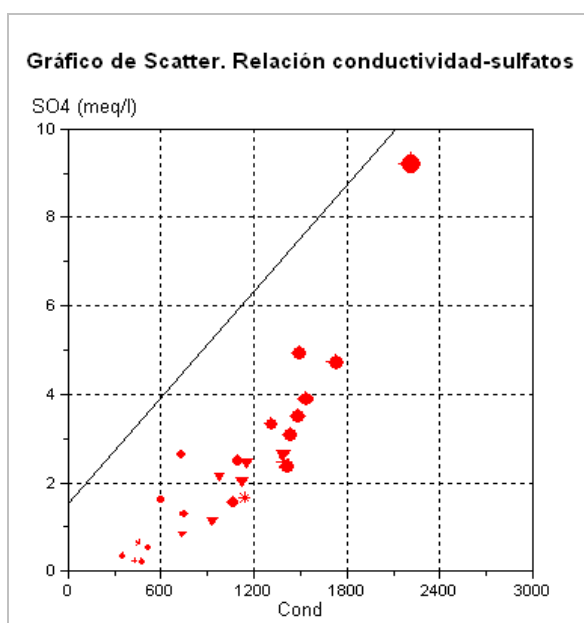


Fig. 3.37. Diagramas de Scatter Conductividad-sulfato.

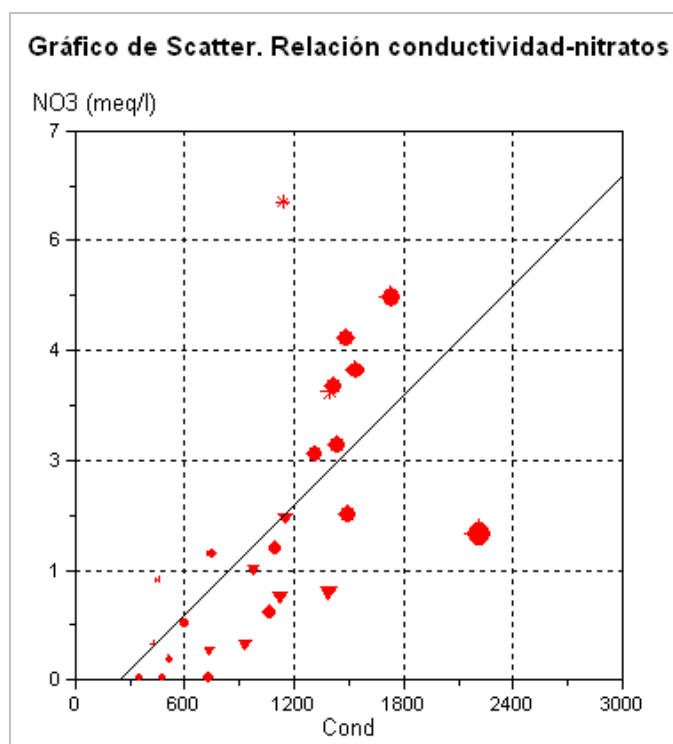


Fig. 3.38. Diagramas de Scatter Conductividad-nitrato

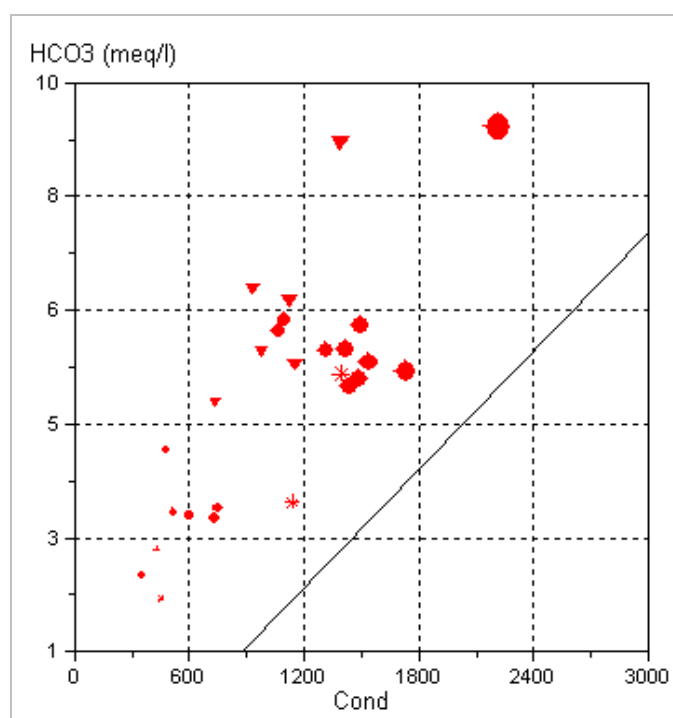


Fig. 3.39. Diagramas de Scatter Conductividad-bicarbonato+carbonato.

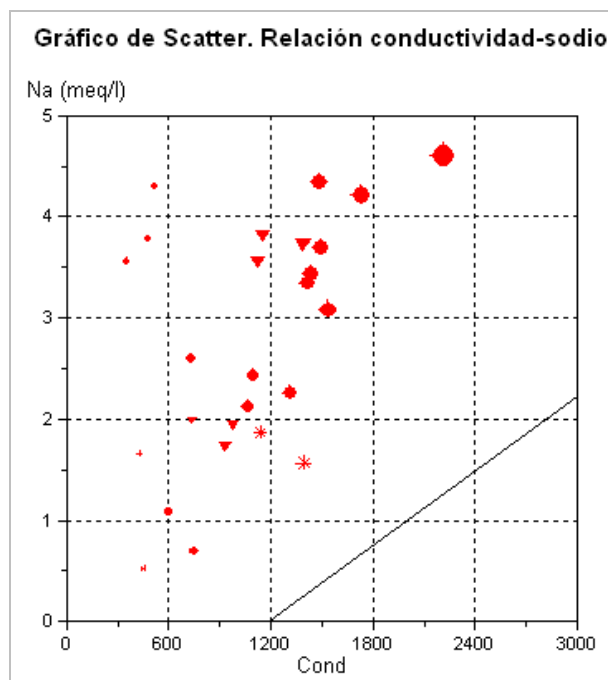


Fig. 3.40. Diagramas de Scatter Conductividad-sodio.

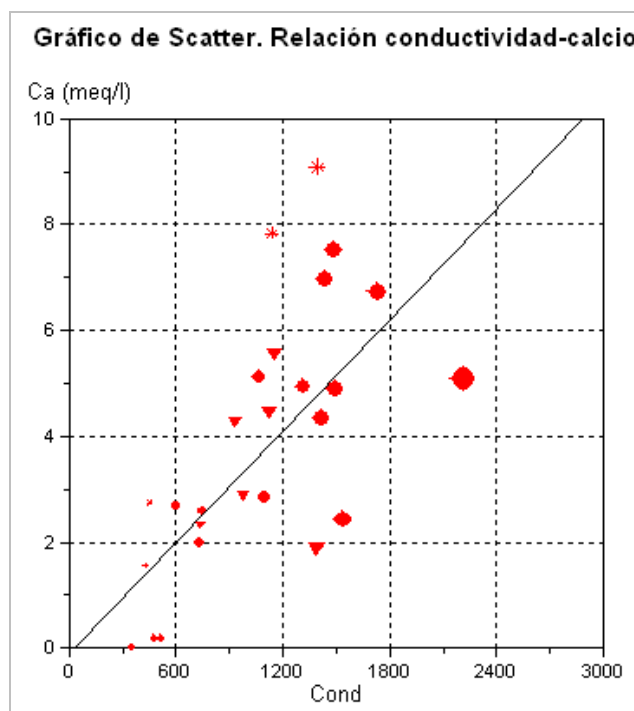


Fig. 3.41. Diagramas de Scatter Conductividad-calcio.

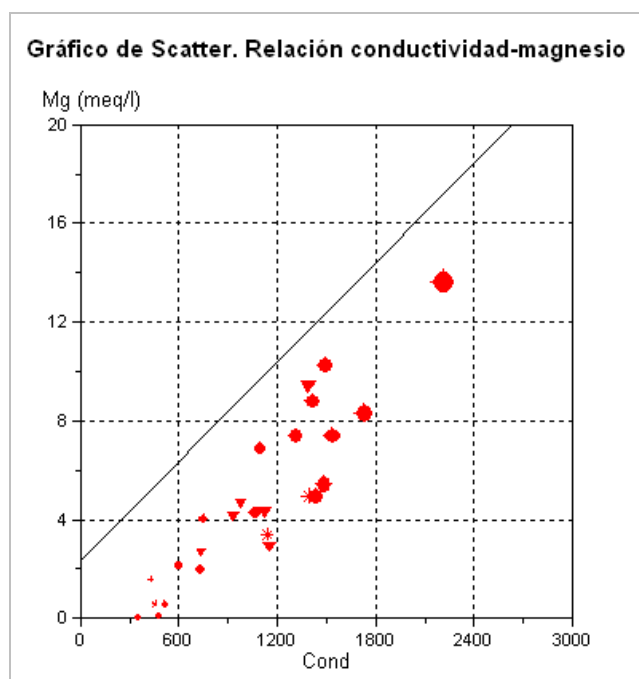


Fig. 3.42. Diagramas de Scatter Conductividad-magnesio.

Las ecuaciones calculadas para la recta de regresión son las siguientes:

- Conductividad-cloruro
 $Y \text{ (meq/l)} = 8,12 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 16,69$
- Conductividad-sulfato
 $Y \text{ (meq/l)} = 3,650 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 1,520$
- Conductividad-nitrato
 $Y \text{ (meq/l)} = 2,338 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 0,578$
- Conductividad-bicarbonato
 $Y \text{ (meq/l)} = 3,118 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 1,734$
- Conductividad-sodio
 $Y \text{ (meq/l)} = 1,226 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 1,456$
- Conductividad-calcio
 $Y \text{ (meq/l)} = 3,516 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 0,125$
- Conductividad-magnesio
 $Y \text{ (meq/l)} = 6,699 X \text{ (}\mu \text{ s/cm)} - 2,376$

Las pendientes de las rectas de regresión indican que las concentraciones de los iones macroconstituyentes aumentan cuando lo hace la conductividad del agua.

Estos resultados indican que la mayor contribución a la salinidad del agua corresponde al anión CO_3H^- y la menor al ión SO_4^{2-} , cuyo coeficiente de correlación es bajo. En cuanto a los cationes la pendiente mayor sigue correspondiendo al sodio y la menor al potasio, siendo mayor para el magnesio que para el calcio. Comparativamente con la etapa previa (diagramas de *Scatter* de la etapa preoperacional, presentados en el Apto. 5.3.2), se aprecia un aumento relativo de magnesio y descenso de sodio y calcio.

• Cartografías de isocontenidos

La variación espacial de todos los iones que componen las muestras analizadas en esta etapa puede ser visualizada con mayor claridad que empleando las restantes herramientas hidroquímicas a partir de la observación de los mapas de isocontenidos e isorrelaciones iónicas.

El tratamiento se ha realizado en primer lugar para la etapa operacional, generando las mismas cartografías que para la etapa previa.

Con posterioridad se han elaborado cartografías de la diferencia entre las mallas generadas para los distintos iones en la etapa previa y durante el primer ciclo de recarga, mediante operaciones de álgebra de mapas.

Las cartografías generadas han sido:

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ión Cl^-
- Distribución de la concentración de ión NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$).
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$).
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y CO_3^{2-}
- Distribución de ión SO_4^{2-}

Estos mapas se adjuntan en el Anexo 3.1.3.4. *Cartografía temática, mapas de isocontenidos para el acuífero superficial*, con objeto de facilitar su observación simultánea.

Las observaciones más importantes que se derivan del análisis de estos mapas son:

– Distribución de conductividad del agua

El mapa hidroquímico correspondiente a la distribución de la conductividad del agua elaborado con los puntos de control del acuífero superficial permite apreciar que las zonas de mayor conductividad se localizan en las inmediaciones de las lagunas salinas desecadas que aparecen dispersas por la zona de estudio, especialmente en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, al norte de Villagonzalo de Coca y en el extremo

noroeste de la *Cubeta*. Se aprecia un gradiente centrífugo descendente desde estos sectores hacia los bordes del acuífero superficial.

La zona de vertido de aguas residuales de Santiuste, que presentaba fuertes indicios de salinidad en 1999 presenta valores más moderados como consecuencia de ser la zona con mayor influencia de la recarga artificial durante el período previo al muestreo.

La nueva cartografía no presenta indicios que desvelen alguna variación relativa al funcionamiento hidrogeológico del acuífero con respecto a la etapa previas. Se corrobora el carácter ganador de los cauces fluviales principales, mientras que las isolíneas adquieren cierto paralelismo con respecto al arroyo de la Ermita, coincidente con el caz de recarga artificial.

El caz de recarga parece incidir en la conductividad de ambos sectores de la mitad meridional, mientras que en la septentrional no se perciben variaciones significativas, dado que la incidencia de la recarga artificial era escasa en el período de muestreo. Se constata además la divisoria hidrogeológica transversal detectada por distintos procedimientos, que coincide con la zona en la que el carácter de las isolíneas presentan mayor divergencia (aproximadamente en el trazado de la carretera de Villagonzalo a Coca).

En el próximo apartado se describen de forma distribuida las variaciones entre la etapa preoperacional y operacional.

– Distribución de la concentración de ión Cl^-

La distribución del ión cloruro no presenta importantes diferencias con respecto a la etapa previa. Las zonas con concentraciones mayores se sitúan entre Ciruelos de Coca (donde hay lagunas salinas desecadas) y Coca. También en el entorno del vertido de aguas residuales de Santiuste, si bien ha habido una disminución importante por dilución tras las operaciones de AR.

Las aguas menos cloruradas se encuentran en la cabecera del arroyo de La Ermita y en los extremos norte y sur de la zona de estudio.

La distribución de la concentración de ión cloruro no presenta paralelismo con los cauces fluviales existentes, sino más bien todo lo contrario. Las isolíneas presentan paralelismo en torno al umbral central, con gradientes descendentes hacia el norte y sur, y son ortogonales u oblicuas a los cauces, al igual que sucede con la distribución de la conductividad.

En las inmediaciones del arroyo de la Ermita, las isocoras sí que presentan un paralelismo mayor que en la etapa previa. Aparentemente las aguas de recarga inducen un rejuvenecimiento en las aguas del acuífero.

De nuevo se constatan diferencias importantes entre el sector septentrional y el meridional.

– Distribución de la concentración de ión NO_3

El origen de este ión está asociado con la actividad agrícola de la zona y, a una escala más puntual, con la contaminación del acuífero con aguas residuales procedentes de la caca. También se han detectado nitratos en el agua de lluvia en concentración inferior a 3 mg/l en muestreos del año 2003, lo que indica que la presencia de este ión es natural en el área en bajas concentraciones.

La distribución de las isolíneas, aunque tradicionalmente tenían una distribución con rasgos comunes con la de los cloruros, durante las labores de AR presentan una serie de domos y cubetas individualizados.

Los domos siguen emplazados sobre las zonas de actividad agrícola más intensa y las zonas con mayor espesor de acuífero cuaternario. En el sector meridional se distribuyen de manera muy parecida a la etapa previa, mientras que en el septentrional los tres domos preexistentes constituyen uno solo, lo que representa un indicio de agravamiento de la contaminación nitrática al norte de Ciruelos de Coca y sureste de Villeguillo.

En la mayor parte del acuífero, la concentración de ión NO_3 sobrepasa los 10 mg/l, detectándose incluso valores de 378 mg/l en el punto RCH-26, con un valor medio de 133 ppm. Los puntos de máximas concentraciones se encuentran ubicados en las inmediaciones de la caca y en un foco “aguas abajo” de un núcleo donde se concentran varias granjas porcinas al noreste de Santiuste.

Las concentraciones mínimas se sitúan en las inmediaciones de los sondeos profundos con dilución de los nitratos, en los extremos norte y sur, en las inmediaciones de Villagonzalo y en las zonas de muy escaso espesor del acuífero cuaternario.

La distribución de isolíneas es bastante homogénea, más o menos lineal y semiparalela al eje de la *Cubeta*.

Las isolíneas cortan a los cauces fluviales principales de manera perpendicular en general, corroborando de nuevo su carácter ganador. Como excepción, cabe destacar el tramo final del río Voltoya, donde presenta un cierto paralelismo.

– Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)

Esta cartografía presenta gran similitud con la de distribución de ión sodio, en vista de los bajos contenidos en potasio en los puntos de la red.

En general la morfología en domos y cubetas propia del período previo ha sido bastante homogeneizada, apreciándose tendencias generales salvo en anomalías puntuales.

El domo que registra valores máximos es el situado en la zona de Ciruelos y Villagonzalo de Coca, cuya concentración disminuye con la distancia, generándose un gradiente desde el oeste hacia el este. De los domos previos persiste tan solo el situado en el *Pinar Nuevo* de Ciruelos y en el extremo sur de la *Cubeta*. El primero es relíctico,

mientras que el segundo parece obedecer a un proceso de migración hacia el sur del domo que había en la zona de vertido de aguas residuales.

Los valores de sodio son más abundantes en los sondeos *intermedios* y *profundos* que en las captaciones hipodérmicas. Las concentraciones máximas aparecen en las muestras de los sondeos 11 y 13, en las inmediaciones de Villagonzalo de Coca y en la cabecera de la cacera de Betaya, donde las alícuotas presentan las mayores saturaciones en halita.

La observación previa según la cual las máximas concentraciones de sodio coincidían con las de nitratos en las zonas de máximo espesor del acuífero no es tan nítida en esta fase.

El contenido en potasio frente al sodio es mínimo. Sólo se han detectado concentraciones importantes en los puntos ns.º 8, 12 y 14, cuya sobresaturación en silvita es superior a 50 ppm. En el primero de los puntos se explica por su vinculación con las lagunas salinas, y en los restantes, posiblemente, por contaminación puntual o presencia de lentejones en el sustrato en zonas de drenaje del acuífero a través de drenes tectónicos.

La tendencia de las isolíneas en el extremo sur de la *Cubeta* parece responder al avance del proceso de rejuvenecimiento de las aguas en la zona de confluencia del caz de aguas residuales con el arroyo de la Ermita.

La zona central, que tradicionalmente presentaba importantes focos de contaminación natural y antrópica, en la actualidad manifiesta un gradiente descendente en sentido oeste-este bastante constante, a pesar de ser una zona con presencia de elementos singulares frecuentes, tales como lentejones salinos, lagunas salinas fosilizadas, cultivos con abundante abonado, humedales desecados y degradados, etc. La mitad norte presenta una tendencia evolutiva similar.

Existen dos zonas en las que hay un gran paralelismo de las isocoras con los cauces fluviales, si bien, corresponden a sectores con gran escasez de información.

– Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)

Estos iones son los mayoritarios en las captaciones más someras de la zona de estudio. De hecho, la mayoría de las muestras contienen calcita y/o dolomita en disolución, aunque en general en un grado de sobresaturación inferior al registrado en 1999.

La evolución de estos iones presenta una tendencia similar a la de los bicarbonatos y sulfatos.

Las concentraciones máximas se han registrado en torno a los cultivos de fresas de Villeguillo al sureste del núcleo urbano, en el sector central junto a la vía del tren de alta velocidad, en la cabecera de la cacera de Betaya y a ambos lados de la confluencia de las caceras de aguas residuales y de recarga al este de Santiuste.

A pesar de que la distribución de la dureza en las aguas del acuífero presentaba una tendencia más o menos clara, con gradiente descendente de oeste a este, durante el primer

ciclo de recarga se han generado más domos individualizados, que parecen corresponder a procesos de intercambio catiónico inducidos por las aguas de recarga.

– Distribución de la concentración de ión CO_3H^-

Como puede verse en esta cartografía hidroquímica, la tendencia general es concordante, en gran medida, con la distribución de los iones calcio y magnesio. En general ha habido una tendencia evolutiva desde un gradiente más o menos regular centrífugo desde la zona de humedales salinos, con dos irregularidades en la etapa preoperacional (1999), a un gradiente subparalelo al eje de la *Cubeta*, en el que continúan los domos ya detectados y se generan nuevas irregularidades en la zona del *Pinar Nuevo* de Ciruelos.

Las mayores concentraciones se observan en el sector occidental de la *Cubeta* y asociados a los sondeos de profundidad intermedia y profunda, que presentan aguas de alta alcalinidad. También hay concentraciones importantes en los focos de contaminación inventariados entre Santiuste de San Juan Bautista y Coca (cabecera de la cacera de Betaya) y en la zona de entrada del “*polo frío oeste*”.

Los sondeos profundos muestreados no presentan saturación de calcita ni de aragonito. Las captaciones que presentan cantidades significativas de estos minerales son las RCH 4, 16, 19 y 26.

Con los datos obtenidos no se ha podido caracterizar la distribución de los bicarbonatos en el acuífero profundo.

– Distribución de ión sulfato $\text{SO}_4^{=}$

La concentración de ión $\text{SO}_4^{=}$ en el acuífero se mantiene alrededor de un valor medio del orden de 50 mg/l (límite de potabilidad).

Hay más abundancia en las captaciones someras, donde casi todas las muestras se encuentran sobresaturadas, que en los sondeos profundos. Las máximas concentraciones se han detectado en las captaciones 9, 11, 12 y 13, coincidiendo con la zona de humedales salinos y la cabecera de la cacera de Betaya, donde además de un drenaje tectónico parece haber lentejones importantes de mineralizaciones salinas en el subsuelo.

Comparando la situación de 1999 con la de febrero de 2003 no se aprecian variaciones significativas en el sector septentrional, mientras que el meridional presenta dos nuevos domos junto a los humedales de Bernuy y en la cabecera del caz de recarga.

• Cartografías de isorrelaciones iónicas

Se han calculado varios índices (relación magnesio/calcio, potasio/sodio, cloruro/bicarbonato, sulfato/cloruro, sodio/calcio, sodio/cloruro, calcio/sulfato, calcio/magnesio, sodio/(calcio+magnesio), sulfato/calcio, relación cuadrática del

calcio/bicarbonato, e índices químicos iónicos y de cambio de bases), seleccionado los cuatro primeros para la elaboración de cartografías:

- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

Estos mapas se presentan en el Anexo 3.1.3.5. *Cartografía temática. Mapas de isorrelaciones iónicas.*

– Distribución de isorrelaciones iónicas magnesio/calcio

Esta isorrelación presenta una clara distribución desde las zonas de recarga del acuífero hacia las zonas de descarga “*aguas abajo*” según el gradiente hidráulico.

En general los valores más altos se localizan en el eje de la *Cubeta* y en las inmediaciones de Ciruelos de Coca.

El índice presentaba un descenso paulatino hacia las zonas de descarga, con fuertes anomalías en zonas de contaminación antrópica y coincidiendo con los drenes supuestos de la *Cubeta*. Durante la recarga mantiene su carácter previo centrífugo desde la zona de humedales salinos hacia el exterior, si bien las isolíneas se ajustan más al eje de la *Cubeta* y al trazado del caz de recarga artificial.

En general se aprecia que estos iones están fuertemente influidos por las operaciones de AR.

– Distribución de isorrelaciones iónicas potasio/sodio

De acuerdo con esta relación iónica, se perciben de nuevo dos sectores claramente disociables. Por un lado en la zona meridional hay una evolución de las aguas subterráneas “*normal*” desde las zonas de recarga hacia las de descarga, con mineralización por envejecimiento coincidente con el gradiente hidráulico de las aguas del acuífero superficial (NE-SO). Este carácter se mantiene constante a lo largo de los dos períodos considerados.

En el sector meridional se aprecian variaciones importantes. El índice manifestaba un importante domo en la fracción de *Cubeta* comprendida entre la localidad de *Santiuste* y el *Cuerno de la Revilla*, sector más por la contaminación antrópica y por anomalías hidrogeológicas. Durante la recarga el domo ha desaparecido, apareciendo en esta zona isolíneas semiparalelas al caz de recarga artificial, con una fuerte inflexión en la zona donde la contaminación previa no ha sido desplazada en su totalidad por las aguas de recarga.

De nuevo en la zona de cabecera de la cacera de Betaya se aprecia un cambio importante en el funcionamiento hidroquímico del acuífero, de modo que las isolíneas semiparalelas al arroyo de la Ermita llegan a cortarle en este sector.

En general, se observa un aumento significativo del índice por efecto de la recarga artificial, por aumento de potasio y disminución de sodio, de forma conjunta y simultánea.

– Distribución de isorrelaciones iónicas cloruro/bicarbonato

Esta relación iónica presenta una distribución concordante con la etapa previa, si bien se aprecia un descenso generalizado del índice y modificaciones puntuales en cuanto a la morfología de las isolíneas se refiere.

Los domos detectados en los sectores septentrional y central persisten, mientras que en el meridional, sector más influido por las operaciones de recarga en el período de muestreo, hay fuertes variaciones.

De los dos domos que había en el sector meridional, coincidentes con la cabecera del caz de recarga artificial y la cacera de aguas residuales de Santiuste, así como en la cabecera de la cacera de Betaya, el primero se ha desplazado hacia el casco urbano, mientras que el segundo ha decrecido en magnitud.

La relación presenta una tendencia general a disminuir, bien sea por descenso de la concentración en cloruros, aumento de bicarbonato o ambas.

– Distribución de isorrelaciones iónicas sulfato/cloruro

La cartografía presenta una distribución atípica, confrontada en general con el funcionamiento del índice, lo que indica la presencia de irregularidades puntuales importantes en el acuífero que malogran su funcionamiento.

El índice presenta un cierto descenso en el sector septentrional, hasta la zona de la carretera de Villagonzalo a Coca, donde se aprecia una mineralización por envejecimiento “normal”, junto con pequeñas anomalías atribuibles a causas tectónicas. En el sector meridional, en cambio, se aprecia un fuerte incremento en la zona más influida por las aguas de recarga, al detectarse en general procesos de intercambio de iones cloruro por sulfatos. Las isolíneas comienzan a adquirir un cierto paralelismo con el trazado del caz principal. Estas podrían estar asociadas a zonas de mayor espesor del acuífero superficial, y podrían guardar relación con procesos contaminantes puntuales, puesto que el máximo coincide con zonas con presencia de granjas.

El estudio de las diferencias mediante la elaboración de cartografías de isolíneas y de isorrelaciones iónicas entre la etapa preoperacional (julio de 1999) y durante la recarga artificial (etapa operacional, febrero de 2003) es abordado en el estudio de pautas de evolución constatadas para la fracción líquida (Aptdo. 7).

Para ello se han elaborado cartografías mediante operaciones de álgebra de mapas de la diferencia de concentración de los distintos iones en el espacio entre la etapa previa y durante el primer ciclo de recarga.

La representación de estas diferencias permite apreciar las variaciones en determinados iones de manera distribuida en los diferentes sectores del acuífero, detectando así procesos hidroquímicos evolutivos prioritarios en el espacio o con cierta dependencia espacial.

5.3.3.2. *Sondeos de profundidad superior a 50 m*

Se incluyen en este grupo a los puntos de agua ns.º 6, 22 y 23.

Los **rangos térmicos** observados en las muestras de este grupo oscilan entre 14°C para el punto 6, y 11°C en el 23, con una T.^a media de 12,8°C.

Los valores de la **conductividad *in situ*** varían entre 290 µS/cm en el punto n.º 23, y los 440 µS/cm en el punto n.º 22. La conductividad media es de 366,6 µS/cm.

La **conductividad** obtenida en el análisis de **laboratorio** oscila entre los valores de 353 µS/cm del punto n.º 23, y 513 µS/cm del n.º 22. La media de los valores cuantificados en el laboratorio es de 446,6 µS/cm, superior a la obtenida en campo al igual que en las captaciones más someras.

En cuanto a la determinación del **pH *in situ***, el rango oscila entre los valores de 8,69 para el punto n.º 6, y de 9,9 para el punto n.º 23, lo que corresponde a unas facies básicas a muy básicas. La media de los valores cuantificados en el campo es de 9,33.

El **pH** obtenido en el **laboratorio** oscila entre los valores de 8,6 para el punto n.º 6, y de 9,7 en el punto n.º 23. La media de los valores cuantificados es de 9,1, valor algo inferior al obtenido en campo.

En cuanto a las facies hidroquímicas, todas ellas son bicarbonatadas sódicas, donde tan sólo cabe destacar que la n.º 23, además, es carbonatada.

Del análisis químico de macroconstituyentes se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 3.57):

mg/l⇒	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃
Min.⇒ (n.º pto.)	82 (23)	0,5 (23)	0,5 (23)	0,5 (23)	14 (6 y 23)	11 (6)	9 (6)	135 (23)	2 (6 y 23)
Máx.⇒ (n.º pto.)	99 (22)	9 (6)	4 (6 y 22)	7 (22)	29 (22)	26 (22)	24 (23)	256 (6)	17 (22)
Media	89,33	3,5	2,8	2,8	19	18	16,6	195,6	7

Tabla 3.57. Análisis hidroestadístico de las muestras de agua. Fase operacional 2003. Captaciones de profundidad superior a 150 m.



Los valores de sodio son abundantes, especialmente con respecto a los restantes iones. Las concentraciones máximas aparecen en las muestras 6 y 13. Sobreponiendo la cobertura de “*posición de los puntos de la RCH-03*” al “*mapa de isopacas*” obtenido a partir de la interpretación de la campaña de prospección geofísica, se detecta que los valores máximos de sodio se ubican en el depocentro de las “cubetas” o paleorrelieves rellenos de un espesor de arenas eólicas muy superior al de las zonas restantes. Este alto contenido en sodio y la naturaleza de las facies induce a pensar en la vinculación de las facies bicarbonatadas sódicas con el flujo más profundo, de acuerdo con un modelo conceptual de *Tóth* a escala regional.

La sodificación de esta agua es media. Son aptas para el regadío aunque hay especies que tolerarían mal esta concentración.

Los restantes iones alcalinos y alcalino-térreos son por lo general escasos. Hay un aumento considerable de calcio en el sondeo 18, cerca del trazado de la cacera de aguas residuales de Santiuste. La baja concentración de estos iones es acorde con la litología arcillo-margosa con escasas intercalaciones carbonatadas en forma de lentes testificadas en los sondeos del acuífero.

En cuanto a los aniones, hay una concentración en especial en las inmediaciones de la cacera (punto 18) y en el sector sur del área de estudio.

En este intervalo de profundidades hay una muestra con elevadas concentraciones de carbonatos (n.º 6).

En cuanto a los nitratos, las concentraciones resultan bajas (7 ppm de media), excepto en el punto 18, sondeo que presenta signos inequívocos de contaminación puntual conservativa.

Dado que tan sólo han sido analizadas tres muestras para este intervalo de profundidades, carece de sentido elaborar mapas de isolíneas que puedan aportar información suficientemente fiable.

A partir de la representación en un diagrama de Piper de estas muestras, se observa que no es apropiado establecer una composición representativa para captaciones de este intervalo de profundidad, al presentar todas ellas una cierta dispersión.

5.3.4. Fase postoperacional. Caracterización de ambientes

En el verano de 2003, al término del primer ciclo de recarga, se llevó a cabo una analítica en puntos considerados de interés hidrogeoquímico, que en algunos casos no coincidían con las redes de control preestablecidas y empleadas en 1999 y en la etapa operacional.

La analítica realizada fue básicamente de parámetros inestables, con tendencia al estudio de la evolución de los parámetros que presentaron un mayor rango de variabilidad, así como de aquellos que, previsiblemente, experimentarían variaciones mayores como consecuencia de la interacción de las aguas de recarga con las aguas del acuífero.

En total fueron tomadas 29 muestras en 26 puntos de agua. En los sondeos profundos se llevó a cabo el muestreo a dos niveles diferentes, con objeto de estudiar la evolución hidroquímica de las aguas en función de la profundidad y temperatura. Esta nueva red ha sido designada “*red postoperacional*”.

En esta red se han añadido parámetros de la margen derecha de los principales cauces fluviales, con objeto de estudiar la evolución de las facies a ambos lados de los cauces de los ríos Voltoya y Eresma. Esta medida ha sido adoptada para avanzar en el conocimiento de la técnica de determinación del carácter de los ríos por su relación con las isolíneas de analítica.

Los parámetros determinados fueron la temperatura del agua y del aire, la conductividad del agua, el total de sólidos disueltos como parámetro complementario a la conductividad, la concentración de hierro total, nitratos y oxígeno disuelto.

Los resultados de las determinaciones realizadas en campo se presentan en el Anexo 3.1.4.1. *Puntos adecuados para la caracterización de ambientes. Fase postoperacional, resultados analíticos.*

En las muestras tomadas no fue posible realizar análisis de macroconstituyentes en laboratorio.

Los parámetros analizados fueron escogidos por su idoneidad para controlar determinados procesos en el acuífero, tales como la evolución de la salinidad después de la recarga; la concentración en nitratos durante la época estival y sus diferencias con la invernal, al haber numerosas captaciones en explotación y efecto reciclaje; la generación de zonas puntuales con ambientes hidroquímicos reductores; la evolución de la concentración en hierro en las aguas, ión con tendencia a precipitar generando procesos incrustantes; y la evolución del pH en el medio, con objeto de diseñar, si fuera preciso, actuaciones de corrección si se generan ambientes propicios para la precipitación de costras carbonatadas en el acuífero.

Un objetivo adicional con consecuencias operativas es la determinación de los ambientes hidroquímicos en torno al caz de recarga artificial. Con los datos obtenidos se pretende realizar perfiles hidroquímicos que permitan estudiar qué relaciones ocurren en las inmediaciones de los dispositivos de recarga, que ambientes hidroquímicos se generan

y como varían los procesos de interacción agua-suelo. De este modo, una vez conocidos los ambientes hidroquímicos y las principales reacciones de interacción, es posible actuar en los ambientes con objeto de lograr la máxima efectividad de las estructuras de recarga, controlando el pH del medio, generando situaciones oxidantes o reductoras mediante técnicas SAT³, atacando químicamente precipitados calcáreos o ferruginosos, etc.

Al igual que en apartados previos se ha realizado un desglose en captaciones someras y sondeos profundos.

De los 26 puntos de la red postoperacional, 24 son pozos o minisondeos y dos corresponden a sondeos profundos.

Con las medidas realizadas se han caracterizado ambientes hidroquímicos del acuífero siguiendo la metodología de los apartados previos y elaborando perfiles hidroquímicos.

Ante la carencia de análisis de macroconstituyentes no ha sido posible establecer cálculos del balance iónico ni comprobaciones sobre la fiabilidad de las medidas, ni tampoco clasificaciones hidroquímicas.

5.3.4.1. Captaciones de profundidad inferior a 50 m

La ausencia de analítica de la mayor parte de iones macroconstituyente imposibilita el cálculo de índices hidrogeoquímicos y de clasificar las aguas de acuerdo con su contenido en iones mayoritarios.

• Análisis estadístico multivariante

El tratamiento estadístico de los parámetros determinados se presentan en las matrices de las Tablas 3.58 a 3.61:

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var (%)
T (Ag)	0.0	23.0	16.493	4.112	24.931	100.0
pH	6.91	9.52	7.624	7.61	99.819	27.0
Cond	179.0	1445.0	668.43	286.538	42.867	88.0
TSD	40.0	722.0	332.289	147.102	44.269	94.0
Fe	0.0	1640.0	560.167	418.387	74.69	100.0
NO3	2.2	150.0	31.293	38.957	124.494	99.0
O2	1.3	8.09	5.565	1.496	26.887	84.0

Tabla 3.58. Fase postoperacional. Captaciones de profundidad inferior a 50 m. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

³Las técnicas SAT o *Soil Aquifer Treatment* constituyen un grupo de técnicas procedimentales basadas en conseguir la máxima efectividad en las operaciones de recarga artificial mediante el control antrópico de ciertos aspectos del acuífero, del agua de recarga y de los dispositivos. Algunas técnicas específicas para laa *Cubeta* son propuestas en el Bloque 5.

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	0.175	0.148	0.147	-0.199	-0.799	7.3E-2
pH		1.0	-0.268	-0.291	0.258	-1.0E-1	0.408
Cond			1.0	0.998	-0.219	-8.9E-2	0.196
TSD				1.0	-0.254	-9.2E-2	0.181
Fe					1.0	0.269	-1.3E-2
NO3						1.0	-1.2E-2
O2							1.0

Punto de corte con el eje Y:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	0.0	7.12	395.33	193.95	1.1E+3	247.39	4.78
pH		0.0	1.6E+3	870.04	-751.89	80.16	-2.1
Cond			0.0	-10.16	816.25	39.34	4.88
TSD				0.0	841.83	39.42	4.95
Fe					0.0	15.21	5.58
NO3						0.0	5.58
O2							0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	4.5E-2	16.75	8.49	-32.67	-12.64	4.5E-2
pH		1.0	-122.35	-68.18	168.62	-6.2	0.972
Cond			1.0	0.512	-0.367	-1.2E-2	1.0E-3
TSD				1.0	-0.82	-2.4E-2	1.8E-3
Fe					1.0	2.6E-2	-4.7E-5
NO3						1.0	-4.4E-4
O2							1.0

Tabla 3.59 a 3.61. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

Las matrices expresadas en meq/l quedarían (Tabla 3.62 a 3.65):

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv. Típ.	Coef. Var (%)
T (Ag)	0.0	23.0	16.493	4.112	24.931	100.0
pH	6.91	9.52	7.624	7.61	99.819	27.0
Cond	179.0	1445.0	668.43	286.538	42.867	88.0
TSD	40.0	722.0	332.289	147.102	44.269	94.0
Fe	0.0	58.739	20.063	14.985	74.69	100.0
NO3	0.035	2.419	0.505	0.628	124.494	99.0
O2	0.041	0.253	0.174	0.047	26.887	84.0

Tabla 3.62. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	0.175	0.148	0.147	-0.199	-0.799	7.3E-2
pH		1.0	-0.268	-0.291	0.258	-1.0E-1	0.408
Cond			1.0	0.998	-0.219	-8.9E-2	0.196
TSD				1.0	-0.254	-9.2E-2	0.181
Fe					1.0	0.269	-1.3E-2
NO3						1.0	-1.2E-2
O2							1.0

Punto de corte con el eje Y:



	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	0.0	7.12	395.33	193.95	40.82	3.99	0.15
pH		0.0	1.6E+3	870.04	-26.93	1.29	-6.6E-2
Cond			0.0	-10.16	29.24	0.634	0.153
TSD				0.0	30.15	0.636	0.155
Fe					0.0	0.245	0.174
NO3						0.0	0.174
O2							0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	4.5E-2	16.75	8.49	-1.17	-0.204	1.4E-3
pH		1.0	-122.35	-68.18	6.04	-1.0E-1	3.0E-2
Cond			1.0	0.512	-1.3E-2	-1.9E-4	3.2E-5
TSD				1.0	-2.9E-2	-3.9E-4	5.8E-5
Fe					1.0	1.2E-2	-4.1E-5
NO3						1.0	-8.6E-4
O2							1.0

Tabla 3.63 a 3.65. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.

La **temperatura** medida *in situ* de las muestras oscila entre los 11°C en el punto 26, y 23° C en el 5. La temperatura media es de 16,5°C, inferior a la registrada en 1999 como promedio de la red RCH-99 en el mismo período de determinación.

Los valores de la **conductividad** medida *in situ* varían entre 179 µS/cm del punto n.º 23, y 1.445 µS/cm del punto n.º 4. La conductividad media es de 668 µS/cm. En general, se aprecia que el intervalo de variabilidad es mayor, así como los valores extremos.

En cuanto a la determinación del **pH in situ**, el rango oscila entre los valores de 6,91 para el punto n.º 10 (Fuente de los 5 Caños), y 9,52 para el pozo n.º 5. Este intervalo también es más amplio que en las mediciones anteriores. Si excluimos los puntos nuevos, el pH más bajo es de 7,3 en el punto 13, lo que implica que todas las muestras son básicas en mayor o menor grado. La media de los valores cuantificados en el campo es de 7,62, bastante más bajo que en la etapa previa, donde la media era de 8,23.

El contenido en **hierro total** oscila entre 0,14 (P-15) y 1,64 ppm (P-23). En general se aprecia una alta concentración de este metal en el acuífero, lo que implica un alto riesgo de formación de precipitados, con incidencia negativa en la tasa de infiltración y amenaza de deterioro a varias estructuras de fábrica y dispositivos de recarga.

Los **nitratos** medidos en campo oscilan entre 0 y 150 mg/l, lo que implica un fuerte descenso con respecto a la etapa invernal en los puntos medidos, si bien no han sido muestreadas captaciones donde se ha constatado importantes concentraciones de este ión. La ausencia de nitratos en captaciones de la margen derecha del río Eresma denota ambientes reductores con presencia de carbonatos.

El **oxígeno disuelto** oscila entre 1,3 y 8,09, con una media de 5,56 ppm. Estos valores son normales en aguas subterráneas e indican un ambiente en general oxidante, con el peligro que ello conlleva en las labores de recarga artificial. La comparación con la

media durante el período operacional (7,79 ppm) muestra que ha habido una desaireación del acuífero durante la fase terminal del ciclo de AR.

Los resultados obtenidos para la fase postoperacional desvelan que las operaciones de recarga artificial no han contribuido a homogeneizar demasiado la variabilidad hidroquímica del acuífero. Además las captaciones empleadas no son similares en ambos períodos, por lo que resulta difícil establecer análisis comparativos.

La escasa disponibilidad de datos de hidroquímica ha introducido la necesidad de diseñar índices hidroquímicos específicos.

- **Índices hidrogeoquímicos y relaciones iónicas**

Dada la importancia de llevar a cabo un control de los iones más influyentes en las operaciones de AR en el sistema, como son el oxígeno disuelto, los nitratos y el hierro, se ha diseñado una relación específica que vincula el oxígeno disuelto con ambos iones, con objeto de ver las condiciones oxidantes y reductoras en el acuífero.

Los nitratos en un medio reductor ceden un electrón pasando a nitritos o amonio, mientras que en condiciones oxidantes tienden a disminuir su concentración en el sistema.

En el caso del hierro pueden generarse precipitados importantes en condiciones tanto oxidantes como reductoras, siendo más impactantes las primeras para las operaciones previstas.

Los índices propuestos relacionan los iones oxígeno disuelto en las aguas del acuífero con nitratos y hierro total, con objeto de deducir la evolución a lo largo del tiempo. De este modo puede ser considerado un indicador de respuesta.

- **Relación molar nitratos/oxígeno NO_3/O_2**

Esta relación permite deducir ambientes hidroquímicos en el acuífero. En general las máximas concentraciones de nitratos aparecen asociadas a las máximas concentraciones de sodio en zonas regables y en cubetas fosilizadas con ambientes generalmente oxidantes. De este modo este índice permite establecer zonas con predominio de reacciones oxidantes que requieren concentrar actuaciones de recarga artificial para minimizar la contaminación.

La relación permite el seguimiento de la evolución de los ambientes hidroquímicos en el acuífero, por lo que puede ser considerado un indicador medioambiental de respuesta.

- **Relación molar hierro total/oxígeno Fe_t/O_2**

El indicador funciona de forma similar al anterior, indicando ambientes oxidantes o reductores y el riesgo de precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro en el sistema. Valores altos indican ambientes reductores, muy profundos o con riesgo de formación de precipitados. De este modo, el indicador puede ser considerado de respuesta.



Los índices calculados para los distintos puntos de la red se presentan en el Anexo 3.1.4.1.

- **Cartografías de isocontenidos e isorrelaciones**

Han sido elaboradas tres cartografías de isocontenidos para los parámetros conductividad, hierro total y nitratos en la fase postoperacional.

Se han elaborado además dos cartografías de isorrelaciones iónicas con los índices elegidos como indicador de respuesta, con el doble objetivo de estudiar la evolución de las aguas subterráneas del acuífero debido a las labores de AR y comprobar la efectividad del indicador en este tipo de estructuras.

En definitiva, las cartografías generadas han sido:

- Conductividad
- Hierro total
- Nitratos

Estas se han incorporado al Anexo 3.1.4.3. *Cartografía temática. Mapas de isocontenidos” para el acuífero superficial.*

– **Distribución de conductividad del agua**

El mapa hidroquímico correspondiente a la distribución de la conductividad del agua elaborado con los puntos de control someros de la *red postoperacional* del acuífero superficial permite apreciar que las zonas de mayor conductividad se localizan también, al igual que en la etapa previa, en las inmediaciones de las lagunas salinas desecadas que aparecen dispersas por la zona de estudio, especialmente en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, al norte de Villagonzalo de Coca y en el extremo noroeste de la *Cubeta*. Se aprecia un gradiente centrífugo descendente desde estos sectores hacia los bordes del acuífero superficial, en general en dirección oeste-este.

A estas zonas hay que añadir un nuevo sector donde aparentemente se ha incrementado la conductividad, coincidente con un aumento de la concentración en nitratos, que corresponde al sector regable situado al sureste de Villeguillo y en la zona del Pinar Nuevo de Ciruelos.

La zona de vertido de aguas residuales de Santiuste, que presentaba fuertes indicios de salinidad en 1999 y valores más moderados en la etapa operacional presenta en este período un gran paralelismo entre las isolíneas y el trazado del caz de recarga artificial. En general ha habido una disminución en este parámetro excepto en el sector noreste.

La nueva cartografía corrobora la desconexión hidráulica entre la cabecera del caz y la zona situada al oeste y delimitada por una divisoria hidrogeológica.



Se constata de nuevo la divisoria hidrogeológica transversal detectada por distintos procedimientos, que coincide con la zona en la que el carácter de las isolíneas presentan mayor divergencia (aproximadamente en el trazado de la carretera de Villagonzalo a Coca).

Las isolíneas son aproximadamente perpendiculares a los cauces fluviales.

– Distribución de la concentración de ión NO_3

La distribución de las isolíneas en esta etapa no presenta grandes variaciones con las cartografías previas. Persiste la distribución de una serie de domos y cubetas individualizados.

Los domos continúan emplazados sobre las zonas de actividad agrícola más intensa y las zonas con mayor espesor de acuífero cuaternario. En el sector meridional se distribuyen de manera muy parecida a la etapa previa, concentrándose una mayor presencia entre la localidad de Santiuste y la cacera de recarga. En el sector septentrional, donde había tres domos en 1999 y uno solo en febrero del mismo año, presenta dos, coincidentes con la zona vulnerable del norte de Ciruelos de Coca y sureste de Villeguillo y en el pinar de Ciruelos y el Cantosal, al oeste de Coca.

La concentración medida no alcanza en ningún caso los extraordinarios valores registrados de hasta 378 mg/l en el punto RCH-26, si bien triplica el límite de potabilidad en varios sectores.

Las concentraciones mínimas se sitúan en torno a la cacera de Betaya y en el borde occidental de la *Cubeta*.

A excepción de los domos, la distribución de isolíneas es bastante homogénea, más o menos lineal y semiparalela al eje de la *Cubeta*.

– Distribución de la concentración de hierro total

El hierro presenta una serie de domos de máxima concentración bien localizados al oeste de Villeguillo, en la zona del Cantosal al oeste de Coca en la Unidad Hidroambiental septentrional oriental y junto a la cacera de recarga hacia el oeste, no prosperando la distribución hacia el este porque el afloramiento del Cuerno de la Revilla representa un límite natural para la expansión de este ión por el acuífero.

La zona con mayor influencia de las operaciones de recarga es la que registra los valores máximos, apareciendo tres domos encadenados entre la cabecera del caz y el Sanchón a lo largo de un bloque delimitado por discontinuidades tectónicas (aparentemente fallas) que constituye un bloque levantado y basculado hacia el noreste.

En la divisoria hidrogeológica transversal al eje de la *Cubeta* se aprecia un fuerte gradiente y la presencia de dos sectores desconectados por una línea paralela al eje de la

Cubeta principal que disecciona esta en dos ramales. El derecho presenta valores de hasta 1000 ppb, mientras que en el oeste oscilan en torno a 200 ppb.

A la vista de los resultados parece haber una correlación importante entre la presencia de hierro en el sistema, la conductividad del agua y las zonas con mayor volumen de recarga artificial almacenado.

Todas las divisorias hidrogeológicas supuestas son de nuevo constatadas y la división en unidades hidroambientales establecida cobra mayor peso, al presentarse nuevos indicios para su delimitación coincidentes con los ya aplicados.

- **Cartografías de isorrelaciones iónicas**

Se trata de una técnica de investigación en desarrollo cuyo seguimiento permitirá comprobar la efectividad de los índices indicados y su validez como indicadores ambientales de respuesta.

Los indicadores permiten a su vez estudiar la distribución de facies en el acuífero, la evolución de las aguas subterráneas, la detección de ambientes hidroquímicos específicos, y, consecuentemente, el funcionamiento del acuífero y las medidas SAT más apropiadas.

- **Distribución de isorrelaciones iónicas hierro total/oxígeno disuelto**

La distribución de esta relación iónica es relativamente coincidente con las isocoras de hierro total, si bien algunos rasgos son acentuados. Las isolíneas en la zona del Cantosal y el Pinar de Ciruelos, al oeste de Coca, denotan una fuerte concentración de hierro y al mismo tiempo unas condiciones ligeramente oxidantes o incluso reductoras. Esta zona coincide con la confluencia de los ríos Eresma y Voltoya y con un sector levantado tectónicamente de escaso espesor de acuífero cuaternario.

Corresponde también al sector sur de la unidad hidroambiental septentrional oriental. En las inmediaciones de este sector en la margen derecha del río Eresma se han detectado sondeos con presencia de carbonatos y ausencia total de nitratos, en ambientes claramente reductores, que parecen guardar cierta conexión con el sector en la margen izquierda del río Eresma por lo menos en cuanto a contenido en hierro se refiere.

El otro foco localizado al oeste del Cuerno de la Revilla no es destacado por esta relación, al haber claras condiciones oxidantes y ausencia de carbonatos, nitritos y, en general, fases reducidas en las aguas subterráneas.

- **Distribución de isorrelaciones iónicas nitratos/oxígeno disuelto**

Esta cartografía presenta una cierta similitud con la anterior y elementos comunes en cuanto a su funcionamiento se refiere.

La zona del Cantosal de nuevo es resaltada como la zona con mayor indicios de tener un ambiente hidroquímico reductor de toda la *Cubeta*. El máximo queda localizado cerca del “*Prado Cerrado*”, zona de confluencia entre los cauces principales.

El otro núcleo localizado entre la localidad de Santiuste y el caz de recarga presenta también indicios para suponer que el ambiente no es oxidante puro y hay zonas focos puntuales de contaminación.

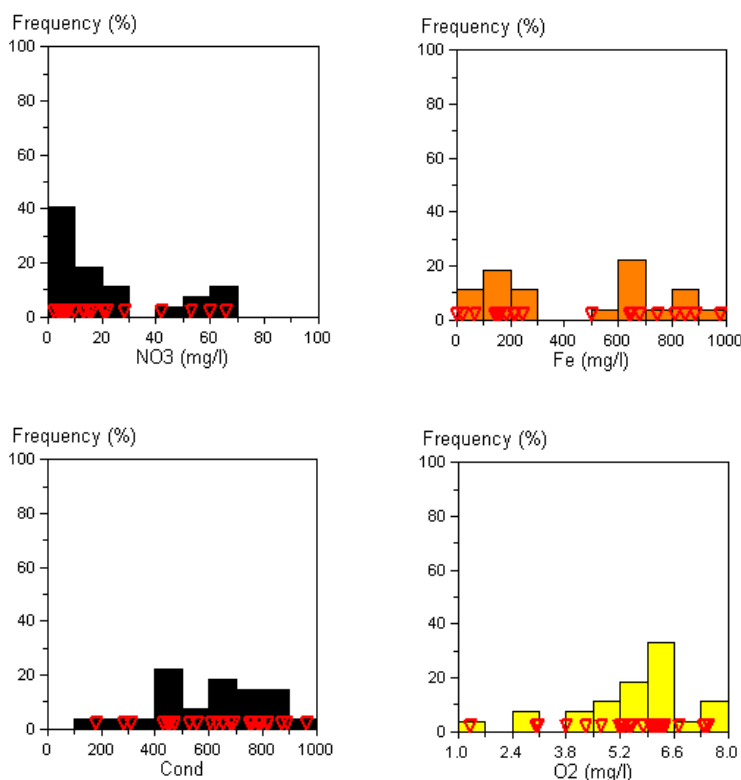
Las isolíneas presentan un gradiente homogéneo en el ramal derecho, mientras que en el izquierdo hay una acusada diferencia entre el sector meridional, donde el gradiente es norte-sur, y septentrional, donde el gradiente es este-oeste.

Las cartografías presentadas parecen ser indicadores apropiados para los fines previstos, si bien es preciso un seguimiento plurianual para comprobar su efectividad.

A tenor de los rasgos observados sería procedente diseñar técnicas SAT para actuar sobre la zona del acuífero con ambientes hidroquímicos reductores y en la zona donde se produce precipitación de hierro por generación de hidróxidos, que cabe esperar que contribuyan a disminuir la tasa de infiltración por efecto de colmatación química pura.

• Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas

La carencia de análisis de macroconstituyentes impide el empleo de hidrogramas clásicos. Al mismo tiempo la escasa disponibilidad de datos y el hecho de corresponder estos a captaciones diferentes impide controlar la evolución de la concentración a lo largo del tiempo. Con objeto de ver la abundancia de iones en las captaciones estudiadas se han realizado histogramas de frecuencias para los principales parámetros analizados, que se presentan a continuación (Figs. 3.43 a-d).



Figs. 3.43 a) – d). Histogramas de frecuencias de la abundancia relativa de ión nitrato, hierro total, oxígeno disuelto y del parámetro conductividad respectivamente en las muestras analizadas.

La mayor frecuencia relativa de nitratos es para bajas concentraciones, de hierro para bajas y altas (dado el carácter zonal de su distribución), mientras que el oxígeno presenta una distribución máxima entre 5 y 6,5 ppm.

A tenor de los resultados obtenidos hay dos focos claros con ambientes hidroquímicos diferenciados del resto de la *Cubeta*, la zona del Cantosal y del Pinar de Ciruelos y la falda oeste del Cuerno de la Revilla. La elaboración de perfiles hidrogeoquímicos contribuirá a conocer los ambientes hidroquímicos y las principales reacciones que ocurren en ellos.

5.3.4.2. Captaciones de profundidad superior a 50 m

En los puntos de control de la fase postoperacional hay dos sondeos de más de 100 metros de profundidad, el P-9 y el P-19 (=RCP 27).

El tratamiento seguido es similar al empleado para captaciones someras, si bien la disponibilidad de datos es inferior y las técnicas a aplicar se reducen drásticamente, permitiendo un tratamiento estadístico de una población de dos muestras y poco más, si bien permite conocer la evolución hidroquímica en profundidad, ya que han sido tomadas muestras en la zona más superficial y profunda de las captaciones.

Estos datos quedarán resaltados con las elaboración de perfiles hidroquímicos, por lo que cabe esperar que esta técnica aporte importantes datos acerca de la distribución de ambientes en la zona y de las reacciones químicas más abundantes.

A continuación se muestran las matrices de correlación elaboradas en mg/l (Tablas 3.66 a 3.69), y en meq/l (Tablas 3.70 a 3.73).

• Análisis estadístico multivariante

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv. Típ.	Coef. Var (%)	
T (Ag)	16.5	19.0	17.75	1.768	9.959	13.0	2
pH	9.17	9.17	9.17	0.0	0.0	0.0	2
Cond	269.9	387.0	328.45	82.802	25.21	30.0	2
TSD	135.3	195.0	165.15	42.214	25.561	31.0	2
Fe	500.0	507.0	503.5	4.95	0.983	1.0	2
NO3	0.0	0.2	0.1	0.141	141.421	100.0	2
O2	5.55	5.66	5.605	0.078	1.388	2.0	2

Tabla 3.66. Fase postoperacional. Captaciones de profundidad superior a 50 m. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.

Punto de corte con el eje Y:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	0.0	0.0	1.2E+3	589.02	553.2	0.0	6.39
pH		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cond			0.0	-2.3	483.87	0.0	5.3
TSD				0.0	484.14	0.0	5.3
Fe					0.0	0.0	-2.31
NO3						0.0	0.0
O2							0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	0.0	-46.84	-23.88	-2.8	0.0	-4.4E-2
pH		1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cond			1.0	0.51	6.0E-2	0.0	9.4E-4
TSD				1.0	0.117	0.0	1.8E-3
Fe					1.0	0.0	1.6E-2
NO3						1.0	0.0
O2							1.0

Tabla 3.67. a 3.69. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

Expresión en meq/l:

	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv. Típ.	Coef. Var (%)	
T (Ag)	16.5	19.0	17.75	1.768	9.959	13.0	2
pH	9.17	9.17	9.17	0.0	0.0	0.0	2
Cond	269.9	387.0	328.45	82.802	25.21	30.0	2
TSD	135.3	195.0	165.15	42.214	25.561	31.0	2
Fe	17.908	18.159	18.034	0.177	0.983	1.0	2
NO3	0.0	0.003	0.002	0.002	141.421	100.0	2
O2	0.173	0.177	0.175	0.002	1.388	2.0	2

Tabla 3.70. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	0.0	-1.0
pH		1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cond			1.0	1.0	1.0	0.0	1.0
TSD				1.0	1.0	0.0	1.0
Fe					1.0	0.0	1.0
NO3						1.0	0.0
O2							1.0

Punto de corte con el eje Y:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	0.0	0.0	1.2E+3	589.02	19.81	0.0	0.2
pH		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cond			0.0	-2.3	17.33	0.0	0.166
TSD				0.0	17.34	0.0	0.166
Fe					0.0	0.0	-7.2E-2
NO3						0.0	0.0
O2							0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	T (Ag)	pH	Cond	TSD	Fe	NO3	O2
T (Ag)	1.0	0.0	-46.84	-23.88	-0.1	0.0	-1.4E-3
pH		1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cond			1.0	0.51	2.1E-3	0.0	2.9E-5
TSD				1.0	4.2E-3	0.0	5.8E-5
Fe					1.0	0.0	1.4E-2
NO3						1.0	0.0
O2							1.0

Tabla 3.71. a 3.73. Matrices de correlación con expresión del coeficiente de correlación, punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.



- **Índices hidrogeoquímicos**

Con los parámetros disponibles no hay ningún hidrograma específico que aporte información relativa a las aguas subterráneas y su evolución. La disponibilidad de dos análisis impide el empleo de diagramas de dispersión y ternarios, al encontrarse los parámetros fuera del rango de representación.

La escasez de datos impide además la elaboración de cartografías temáticas.

En general la influencia de las operaciones de AR y mezcla de las aguas del acuífero profundo con las de recarga conlleva una dilución de los iones más abundantes, ya que el agua de recarga es de mineralización muy débil.

Se ha detectado una clara zonalidad en cuanto a ambientes oxidantes o reductores se refiere, aspecto a tener en cuenta para llevar a cabo actuaciones operativas y técnicas SAT adecuadas en futuros ciclos de recarga artificial que permitan elevar la tasa de infiltración, evitar precipitados y generación de costras de hierro y carbonatos que se comporten como barreras ante el paso del agua, la presencia de oxígeno disuelto en las aguas subterráneas en gran medida inducido por las operaciones de recarga, etc.

Todos estos aspectos serán tenidos en cuenta en el diseño de dispositivos y actividades previstas en el próximo apartado.

5.3.5. Elaboración de perfiles hidroquímicos para la determinación de ambientes

La herramienta complementaria que hemos considerado más apropiada para estudiar los ambientes y procesos ha sido la elaboración de perfiles hidroquímicos con datos de captaciones someras y profundas.

Los perfiles hidrogeoquímicos que atraviesan cauces fluviales deben ser transversales y tener bien ubicados los pozos. La geología debe ser bien conocida y especial importancia adquieren las líneas de flujo en torno al canal (*Woessner, 2000*).

La toma de datos se ha realizado seleccionando captaciones situadas a ambos lados del cauce de recarga artificial, con objeto de detectar procesos de influencia diferencial, así como en captaciones cercanas situadas en márgenes opuestas de los ríos Voltoya, Eresma y arroyo Balisa, con la misma finalidad.

La disponibilidad de datos analíticos a distintas profundidades en al menos dos sondeos profundos ha aportado información para el conocimiento de la evolución hidroquímica de las aguas en la vertical.

Por ejemplo, en el caso de los nitratos, se observa un aumento en la concentración en nitratos en la vertical hasta los 15-20 metros por debajo del nivel freático en los puntos de agua RCP 27 y RCR 4. A partir de esta profundidad comienza a decrecer.

En la horizontal, la delimitación de la zona con predominio de condiciones oxidantes puede ser determinada por medidas en perfiles transversales y verificadas en programas de muestreo (*Stuyfzand et al, 2002a*).

La presencia de nitratos y oxígeno disuelto en las aguas de recarga incide en el sistema anaeróbico de las aguas subterráneas, disminuyendo la capacidad reductora de los sedimentos del acuífero. De este modo los nitratos y ciertos pesticidas se pueden expandir una mayor distancia en el acuífero, ya que su atenuación es menor en condiciones oxidantes (*de Hongs et al, 2002; EEA, 2002*).

De este modo, los perfiles transversales se configuran como herramienta adecuada para estudiar la evolución y extensión de ambientes oxidantes y/o reductores.

En el Anexo 3.1.6. *Perfiles hidroquímicos*, se presentan los puntos seleccionados para la elaboración de perfiles hidroquímicos (puntos extremos). Los puntos extremos o intercalados en los perfiles se presentan con un mismo color. En general son perfiles sencillos que atraviesan al caz o a ríos con dos puntos, excepto dos perfiles que cuentan con tres puntos de control. Su posición es especificada en la Fig. 3.58.

Los criterios para la selección de perfiles son los siguientes:

- Los perfiles atraviesan zonas de cierta heterogeneidad hidroquímica.
- Los perfiles permiten reflejar la evolución de las aguas con operaciones de AR. Para ello se han seleccionado puntos de agua ubicados a ambos lados del caz de recarga o de los cauces fluviales principales.
- Los puntos de agua permiten su muestreo y presentan suficiente profundidad para poder establecer tendencias evolutivas con la profundidad.

De acuerdo con estos criterios se han elaborado un total de 16 perfiles con varias capas diferenciadas. Estos atraviesan el caz de recarga o los cauces fluviales principales.

Una vez definidos se ha procedido al muestreo y a la determinación de ciertos parámetros inestables “*in situ*”. En concreto, se ha determinado la conductividad, pH, salinidad, total de sólidos disueltos, temperatura del agua y del aire en el momento del muestreo y la concentración en hierro total y nitratos.

La campaña de medición se ha realizado a lo largo del mes de julio de 2003.

Los resultados de las determinaciones se presentan en la Tabla 3.74. Los valores más destacables se han marcado con negrita y se comentan a continuación:

La primera columna corresponde al perfil realizado, la segunda al n.º de inventario, las restantes, respectivamente, a coordenadas UTM, naturaleza, profundidad actual, medida del nivel del agua con respecto al nivel medio del terreno en verano de 2003, profundidad del muestreo y cota de las muestras en m.s.n.m.

La topografía ha sido obtenida de la intersección de la proyección del perfil con el MDT. El nivel del agua es el correspondiente a la fecha de medición, julio de 2003,

calculado por la intersección del perfil con la superficie freática. El contacto entre las facies Arévalo y facies Cuestas ha sido deducido de los 314 datos disponibles, obtenidos por procedimientos directos (sondeos y afloramientos) e indirectos (prospección geofísica).

La posición de los perfiles realizados se presenta en el Apto. 7.4. En ellos figura, en amarillo, la fracción no saturada del perfil; en turquesa, la zona saturada; y en naranja, el basamento impermeable de facies Cuestas (acuitardo).

Sobre los perfiles se han trazado mapas de isocontenidos de los parámetros considerados más interesantes, como son la conductividad (color violeta); el contenido en nitratos, con objeto de ver los cambios de concentración como consecuencia de las operaciones de recarga artificial y con el aumento de profundidad (en color verde), la concentración en hierro total (en color marrón) y en oxígeno disuelto, con objeto de detectar ambientes reductores y zonas susceptibles de generar ambientes muy oxidantes que contribuyan a la formación de precipitados y se incremente el riesgo de dañar las estructuras y dispositivos, y, al mismo tiempo, detectar las zonas para ubicar actuaciones SAT (en color azul).

Los sondeos han sido marcados con un aspa roja. La nomenclatura corresponde a la de la Tabla 3.74. Las estrellas azules corresponden a la profundidad de muestreo.

El hecho de disponer de un medidor de hierro total ha impedido diferenciar entre los iones Fe^{++} y Fe^{+++} , lo que supone un impedimento para la elaboración de cartografías molales en miliequivalentes por litro. En tal caso se ha optado por presentar estos perfiles en concentraciones molares, dado que el principal objetivo es detectar variaciones relativas de un ión determinado.

Con los datos disponibles se ha realizado una georreferenciación en la vertical y trazado mapas de isolíneas. El interpolador empleado ha sido el krigging. De este modo, se obtiene una cierta extrapolación en el trazado de isocoras, si bien quedan zonas del acuífero con carencia de información. Los perfiles realizados han sido blanqueados con ficheros que extraen la información extrapolada relativa a concentración en la zona no saturada o del acuitardo impermeable.

En el trazado de perfiles se ha considerado como punto de recarga el fondo del caz, si bien este punto puede diferir en el espacio dependiendo de la fase de recarga, cambiando si la recarga se encuentra en fase de control vertical, en control lateral, etc.

Con los resultados finales se ha elaborado una cobertura específica para su tratamiento geográfico, así como perfiles hidrogeológicos e hidroquímicos.

Los perfiles elaborados se adjuntan en el Anexo 3.1.6. *Perfiles Hidroquímicos*.

Fig. 3.44. Mapa con la posición de los perfiles hidroquímicos realizados a escala 1:40.000 (página siguiente).



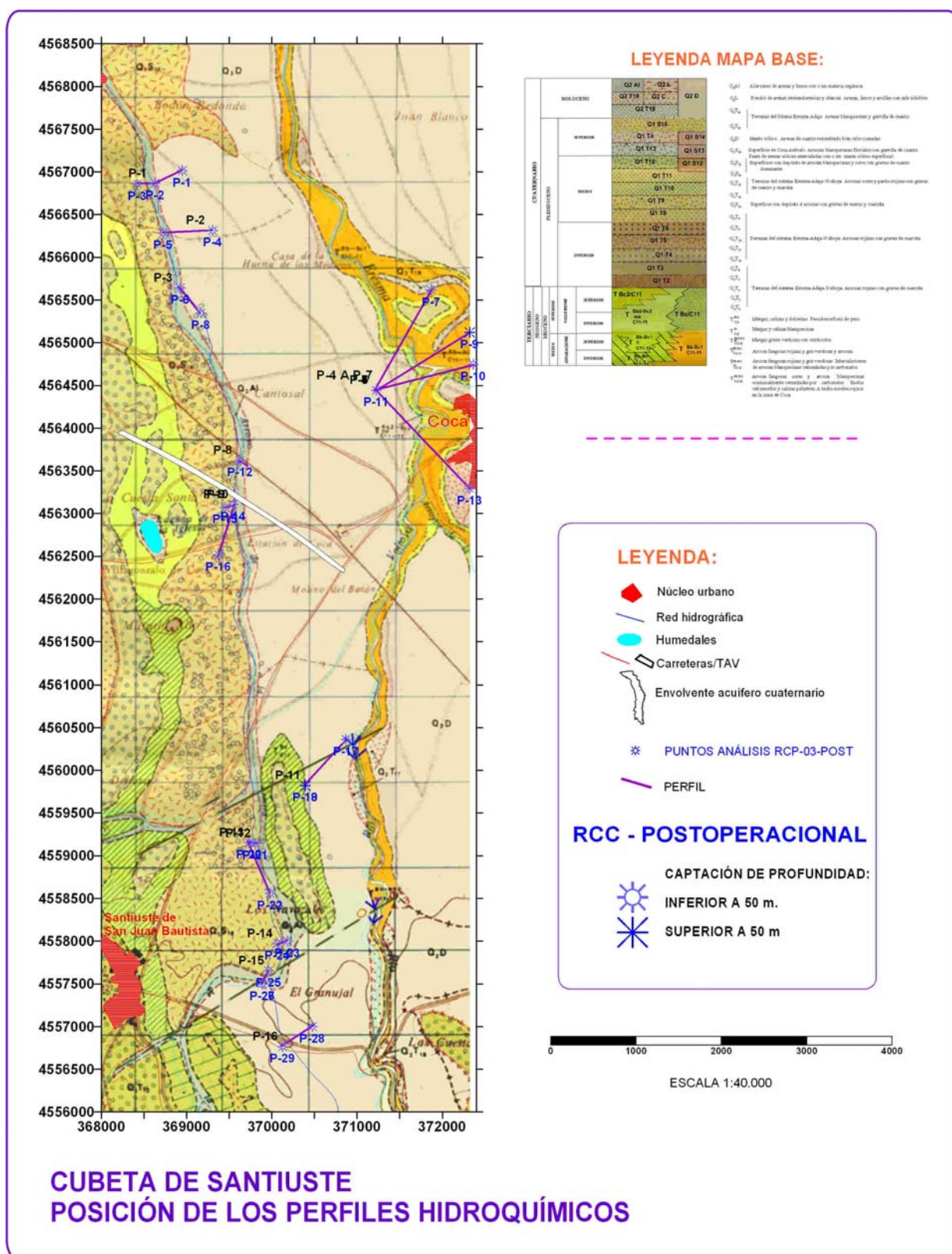


Fig. 3.44. Mapa con la posición de los perfiles hidroquímicos realizados a escala 1:40.000





PERFIL	PUNTO	X	Y	Z	NAT	Prof. Act (m)	N.E. (m)	Prof muestra	cota muestra
P-1	INV-76	368629	4566865	773,3	S	?	n/a	0	773,3
P-1	INV-193	368948	4567013	773,8	S	?	n/a	20	753,8
P-1	INV 78	368421	4566857	773,1	P	12	5,06	9	764,1
P-2	INV-84	369306	4566315	778,7	Pi	20,5	10,62	13	765,7
P-2	INV 61	368722	4566285	775,2	P	7,5	5,82	6,5	768,7
P-3	INV 94	368926	4565642	775,0	Pi	20	1,84	4,5	770,5
P-3	INV 103	369166	4565346	773,9	P	7,6	2,42	6,5	767,4
P-4	INV-121	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-4	INV-95	371870	4565615	754,8	S	5,7	3,7	5	749,8
P-5	INV-121	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-5	INV-112	372320	4565121	766,2	P	115?	50	67	699,2
P-6	INV-121	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-6	INV-117	372364	4564746	757,6	M	0	0	0	757,6
P-7	INV-121	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-7	INV-136	372322	4563291	774,9	P	4,2	2,51	3	771,9
P-8	INV-129	369626	4563622	779,6	Pi	23	2,28	6	773,6
P-8	INV-135	369694	4563335	785,3	S				jul-03
P-9	INV-139	369546	4563107	783,7	P	?	n/a	9	774,7
P-9	INV 141	369454	4563073	784,1	S	22	n/a	30	754,1
P-10	INV-139	369546	4563107	783,7	P	?	n/a	9	774,7
P-10	INV-154	369373	4562516	784,5	S	27,8	8,63	20	764,5
P-11	INV-217	370391	4559822	792,6	S	>100	42	45	747,6
P-11	INV-217	370392	4559822	792,6	S	>100	42	90	702,6
P-11	INV-196	370868	4560359	773,6	M	0	0	0	773,6
P-12	INV-243	369807	4559143	797,2	P	4,2	3,64	4	793,2
P-12	INV-240	369732	4559154	797,9	S	8	4	7	790,9
P-13	INV-240	369732	4559154	797,9	S	8	4	7	790,9
P-13	INV-261	369979	4558559	798,3	Pi	21	14,65	18	780,3
P-14	INV-287	370063	4557972	800,9	P	3,9	3,3	3,6	797,3
P-14	INV-285	370182	4558002	800,3	P	3,9	2,76	3,1	797,2
P-15	INV-296	369961	4557653	802,7	Pi	7,3	6,57	7	795,7
P-15	INV-298	369889	4557497	801,8	P	14,8	6,8	8,8	793,0
P-15	INV-298	369889	4557497	801,8	P	14,8	6,8	13	788,8
P-16	INV-309	370124	4556765	800,2	Pi	38	10,57	20	780,2
P-16	INV-303	370474	4556999	803,8	Pi	39	19,51	24	779,8

Tabla 3.74. Puntos elegidos para el trazado de perfiles con determinaciones hidroquímicas. La primera columna corresponde al perfil realizado, la segunda al n.º de inventario, las restantes, respectivamente, a coordenadas UTM, naturaleza, profundidad actual, medida del nivel del agua con respecto al nivel medio del terreno en verano de 2003, profundidad del muestreo y cota de las muestras en m.s.n.m.

A continuación se describen los perfiles trazados y se comentan los resultados, con objeto de caracterizar ambientes hidroquímicos, determinar las zonas con predominio de determinadas reacciones químicas en una dirección determinada y contribuir al conocimiento del acuífero con objeto de diseñar y focalizar actuaciones tipo SAT apropiadas.

– Perfil 1

El perfil 1 es el más septentrional de la zona de estudio, estando en el extremo del caz durante el primer ciclo de recarga, entre el Pinar Nuevo de Ciruelos y Villeguillo. Su orientación aproximada es oeste-este y atraviesa perpendicular al caz de recarga. Ha sido realizado a partir de las concentraciones medidas en tres puntos de la nueva red de control, P-1, P-2 y P-3.

En general se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas para los cuatro parámetros determinados.

La **conductividad** tiende a aumentar con la profundidad, sin que haya un gradiente claro entre las aguas subterráneas localizadas en ambos extremos del perfil. Las captaciones someras presentan un rango de conductividad parecido, mientras que el valor del sondeo profundo emplazado a la derecha del perfil es mucho más alto, demostrando una tendencia al aumento de la mineralización con el aumento de la profundidad.

La distribución del ión **nitrito** presenta de nuevo un ligero gradiente y un ordenamiento en base a criterios ya conocidos. En general, tiende a aumentar con la profundidad en captaciones someras, siendo este valor muy superior en caso de que las captaciones estén ubicadas en zonas del acuífero de gran espesor (paleocubetas). Esta concentración tiende a disminuir en sondeos profundos que penetran en el acuitardo terciario o en el acuífero profundo.

La distribución del **hierro total** tiende a aumentar hacia el oeste del caz de recarga y disminuir hacia el este. Las isocoras para las captaciones preexistentes confirman este gradiente descendente desde el oeste hacia el este.

El **oxígeno disuelto** se ve incrementado en las captaciones someras de gran diámetro con respecto al agua de recarga, mientras que en minisondeos y sondeos profundos aumenta hasta una profundidad determinada y posteriormente tiende a descender.

– Perfil 2

El perfil 2 queda ubicado ligeramente al sur del anterior, tiene una orientación similar y también se encuentra diseccionado por el caz de recarga. Consta de un sondeo profundo (P-5) y un pozo hipodérmico (P-4). La mayor parte del perfil se encuentra en zona de pinar.



En general, se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas para los tres parámetros determinados (no ha podido ser determinado el hierro en P-4 por encontrarse fuera del rango de determinación del aparato empleado).

La **conductividad** tiende a aumentar con la profundidad, existiendo un cierto gradiente ascendente hacia el este de forma simultánea.

La distribución del ión **nitrito** presenta una tendencia idéntica a la conductividad, si bien es muy inferior en el sondeo profundo.

La distribución del **hierro total** aparentemente tiende a aumentar hacia el este.

El **oxígeno disuelto** se distribuye de forma similar al perfil anterior, aumentando en las captaciones someras de gran diámetro con respecto al agua de recarga hasta una profundidad de 10 a 12 m y posteriormente tiende a descender. En la horizontal parece presentar un ligero incremento hacia el este (pinar).

– Perfil 3

El perfil 3 queda ubicado ligeramente al sur del anterior. Tiene una orientación noroeste-sureste y disecciona al caz de recarga en su extremo oeste. Consta de un sondeo profundo (P-6) y un minisondeo (P-8) que penetra escasos metros en las Facies Cuestas.

En general, se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas para la mayoría de los parámetros determinados.

La **conductividad** tiende a aumentar con la profundidad, existiendo un cierto gradiente ascendente hacia el este de forma simultánea, a pesar de que la captación de la derecha es menos profunda.

La distribución del ión **nitrito** aumenta con la profundidad en el sondeo profundo, mientras que en el minisondeo presenta una inflexión, ya que aumenta hacia el este y luego disminuye bruscamente. No hay variaciones significativas entre el minisondeo que atraviesa parcialmente el acuitado y el pozo hipodérmico excavado en arenas en su totalidad.

La distribución del **hierro total** tiende a aumentar con la profundidad de forma moderada y con mayor gradiente hacia el este.

El **oxígeno disuelto** aumenta ligeramente con la profundidad en el extremo oeste, mientras que el minisondeo del extremo este presenta una concentración similar a la del agua de recarga. Esto puede estar motivado porque el muestreo fue realizado por bombeo, con el consecuente batido que provocan las turbinas en la bomba y enriquecimiento en oxigenación.

– Perfiles 4 a 7



Los perfiles 4 a 7 quedan ubicados en la zona de confluencia de los principales cauces fluviales. El extremo oeste es común para los cuatro perfiles, habida cuenta de la escasez de puntos en esta zona de pinar. Se trata de un piezómetro perforado en seco que ha tenido problemas de sifonamiento, un escaso desarrollo en zona saturada e importantes concentraciones de hierro en todo el sector.

El perfil 4 atraviesa el río Eresma. El punto del extremo este es el P-7 de la nueva red de control, que corresponde a un sondeo somero situado en las inmediaciones de Prado Cerrado.

El perfil 5 corresponde a un pozo en las afueras de Coca. La muestra fue tomada a nueve metros de profundidad.

El perfil 6 pasa exactamente por la zona de confluencia entre ambos cauces. El punto P-10 corresponde a un manantial, la *fuentes de los 5 caños*, escogida por la escasez de puntos de agua en el sector.

El perfil 7 atraviesa el río Voltoya, conectando el piezómetro con un pozo hipodérmico en las huertas de las afueras de Coca por el suroeste.

Todos los perfiles trazados presentan una gran desconexión hidráulica entre los puntos situados en la margen derecha y el de la izquierda. El trazado de los perfiles confirman el carácter ganador de ambos ríos en este tramo, así como la presencia de afloramientos de margas en la zona de confluencia. Estos afloramientos han sido interpretados por ascenso tectónico a favor de un bloque individualizado, con levantamiento relativo con respecto a los adyacentes.

El perfil 4 presenta una zona de desconexión hidroquímica constituida por el río Eresma, de modo que a ambos lados se genera un gradiente por miscibilidad entre las aguas del acuífero y el aluvial del río. Este gradiente se percibe con más claridad en la margen izquierda, donde el desarrollo de terrazas es mayor, que en la derecha.

Los perfiles 5 a 7 presentan una configuración muy parecida al perfil 4. El tamaño del acuífero cuaternario es tan reducido que resulta difícil llevar a cabo un seguimiento de la evolución, si bien se aprecia un gradiente descendente en cuanto a la concentración en nitratos, hierro total y conductividad desde las captaciones hacia el río y ascendente en oxígeno disuelto. La desconexión hidráulica entre ciertos sectores del acuífero impide llevar a cabo un seguimiento detallado del gradiente, si bien el descenso es muy brusco a lo largo del aluvial y más paulatino a lo largo del acuífero eólico.

– Perfil 8

El perfil 8 queda ubicado en las inmediaciones de la zona de confluencia del río con el cruce de la carretera de Ciruelos a Coca, en concreto en la margen sur de la antigua vía del tren, actualmente desmantelada. Conecta un piezómetro de observación con un sondeo profundo perforado a percusión. ONO-ESE y escasa extensión, si bien queda comprendida la formación aluvial cartografiada para el arroyo de la Ermita.

En general, se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas de ambos puntos para la mayoría de los parámetros determinados. El mismo hecho se aprecia entre el piezómetro de observación y el sondeo profundo, si bien la tendencia queda enmascarada por la presencia del bulbo de humidificación interpuesto entre ambos en la horizontal.

La **conductividad** tiende a aumentar bruscamente con la profundidad, especialmente en el sector oeste. Hacia el este, dado que el espesor saturado es escaso, se aprecia un gradiente similar aunque más progresivo.

La distribución del ión **nitrito** es similar a la de la conductividad para el sector oriental del perfil, mientras que el occidental presenta un gradiente muy inferior, ya que el sondeo profundo presenta una concentración en nitrato inferior al piezómetro.

La distribución del **hierro total** tiende a aumentar con la profundidad de forma drástica. Este aumento resulta más progresivo hacia el este, demostrando que la concentración de hierro de forma natural en este sector es elevada.

El **oxígeno disuelto** en este caso presenta mayor concentración en el piezómetro de observación que en el agua de recarga, siendo más alta en ésta que en el piezómetro.

En general, se aprecia que el perfil se ha trazado en una zona de escaso espesor saturado, alta salinidad, elevada concentración en nitratos y en hierro en este sector del acuífero.

– Perfil 9

El perfil 9 queda ubicado ligeramente al sur del anterior, tiene una orientación ortogonal y una longitud ligeramente menor. También se encuentra diseccionado por el caz de recarga. Consta de un minisondeo (P-15) y un pozo hipodérmico (P-14). La mayor parte del perfil se encuentra en zona de regadío.

Se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas para todos los parámetros determinados.

La **conductividad** tiende a aumentar con la profundidad, existiendo un claro gradiente desde el este, donde está el caz, hacia el oeste, donde se encuentra la captación más profunda.

La distribución del ión **nitrito** presenta una tendencia idéntica a la conductividad entre el caz de recarga y el pozo, disminuyendo desde ese sector hacia el sondeo profundo. El gradiente varía de manera paulatina, contribuyendo el escaso espesor saturado registrado en el perfil.

La distribución del **hierro total** aumenta con la profundidad en la vertical, disminuyendo hacia el oeste, es decir, se aprecia una mayor concentración de hierro en el pozo hipodérmico que atraviesa el acuífero cuaternario que en el sondeo que penetra en la formación Cuestas. De nuevo queda desvelada la alta concentración de hierro en la UHA septentrional oriental.



El **oxígeno disuelto** presenta un gradiente ascendente hacia el oeste, pero la tendencia no es significativa, dado que la muestra fue extraída por bombeo.

– Perfil 10

El perfil 10 tiene una orientación noreste-suroeste, y atraviesa la carretera que une Villagonzalo con Coca. Este trazado se ha considerado coincidente con la divisoria de aguas subterráneas que delimita el sector septentrional del acuífero del meridional, divisoria identificada por diferentes metodologías. El trazado del perfil de nuevo confirma la existencia de esta divisoria, al haber un umbral de facies Cuestas que separa una zona del acuífero de escaso desarrollo al norte y una paleocubeta con un espesor considerable de acuífero cuaternario al sur.

El perfil conecta un pozo en el que la muestra fue extraída a 9 m de profundidad con un minisondeo donde se extrajo a 30 m.

Se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas de ambos puntos para la mayoría de los parámetros determinados.

La **conductividad** tiende a aumentar bruscamente con la profundidad, generando un gradiente bastante alto.

La distribución del ión **nitrito** también aumenta de norte a sur, coincidiendo con su máxima concentración en zonas de acuífero grueso.

La distribución del **hierro total** tiende a disminuir de norte a sur. La divisoria de aguas subterráneas parece actuar simultáneamente como divisoria de la distribución de hierro en el sistema.

El **oxígeno disuelto** se mantiene entre límites muy estrechos en todos los puntos del perfil.

La variación relativa de hierro confirma la importancia de la barrera hidrogeológica ortogonal al trazado del perfil, si bien los restantes parámetros no confirman claramente esta tendencia aunque tampoco ninguna otra.

– Perfil 11

El perfil 11 queda ubicado en la falda noreste del Cuerno de la Revilla, y conecta un sondeo profundo perforado en la UHA meridional oriental (uno de los muy pocos), que ha sido muestreado a 45 y 90 metros de profundidad, con un manantial existente en la margen izquierda del río Voltoya denominado la Fuente Fría.

El perfil atraviesa uno de los lineamientos deducidos por fotointerpretación, atribuyéndose a esta fuente un funcionamiento relacionado con la tectónica.



La gran variabilidad entre los parámetros determinados y la disparidad entre los puntos de muestreo impide realizar perfiles hidroquímicos fiables, si bien se obtienen cierta información de interés.

El perfil atraviesa un lineamiento que se manifiesta como una pequeña paleocubeta o zona donde se almacena agua en el acuífero. En su extremo este esta *Cubeta* está represada por un relieve positivo en las facies Cuestas, que regula el drenaje del acuífero hacia el río Voltoya, por lo que la Fuente Fría parece estar regulada por el desbordamiento por encima de este nivel del nivel freático del sector.

En la zona de caída por la margen derecha, donde se ha detectado un aluvial de escaso desarrollo, predominando las facies eólicas, hay un brusco gradiente descendente entre el agua de la fuente Fría y del río Voltoya, de menor concentración en todos los parámetros e iones analizados.

– Perfil 12

El perfil 12 ha sido realizado con orientación este-oeste en la falda oeste del sector central del Cuerno de la Revilla, uniendo un pozo y un sondeo somero muestreados a 4 y 7 m respectivamente.

Ambas captaciones se encuentran en la falda de una colina de materiales terciarios, por lo que el espesor de acuífero es reducido y el espesor saturado también. El caz de recarga discurre bordeando el afloramiento de facies Cuestas, por lo que el bulbo de humidificación tiende a expandirse hacia el oeste, al tener una barrera impermeable que imposibilita su desplazamiento hacia el este. Por este motivo se genera un gradiente importante de componente vertical, sin que haya variaciones importantes entre las captaciones muestreadas salvo por su cercanía al caz de recarga.

La **conductividad** tiende a aumentar bruscamente con la profundidad, aumentando ligeramente a medida que aumenta el espesor y el espesor saturado del acuífero.

La distribución del ión **nitrito** presenta una distribución centrífuga, obteniéndose una concentración mayor en el pozo adyacente al caz que en el sondeo más alejado. La morfología de las isocoras está condicionada por la mezcla de aguas del caz con las del acuífero, por lo que el gradiente observado es oblicuo. La mayor concentración de nitratos en un punto de escaso espesor de acuífero contrasta con todas las observaciones realizadas en los perfiles restantes. Este fenómeno puede ser explicado por procesos de contaminación puntual. A este respecto conviene mencionar que hay granjas porcinas en la zona de cabecera de la captación.

La distribución del **hierro total** es coincidente con la de la conductividad, generándose un gradiente horizontal ligeramente oblicuo entre la falda de la colina y la zona de acuífero más potente.

El **oxígeno disuelto** se mantiene entre límites muy estrechos en todos los puntos del perfil, si bien tiende a aumentar con la misma tendencia que el hierro. Este hecho podría ser indicativo de la aireación de este sector del acuífero durante las operaciones de recarga artificial.



– Perfil 13

El perfil 13 es perpendicular al anterior, compartiendo el punto P-20. su orientación es norte sur, semiparalelo al afloramiento de facies Cuestas del Cuerno de la Revilla. Conecta un minisondeo que ha sido muestreado a 8 metros de profundidad con un piezómetro muestreado en el metro 21. El caz de recarga está ubicado entre ambas captaciones, más cerca del extremo sur que del norte, con un alejamiento progresivo en este sentido, resultando una posición relativa oblicua de ángulo agudo (ver Mapa 3.58). El espesor del acuífero aumenta hacia el sur.

La **conductividad** presenta un gradiente con isolíneas subhorizontales en la zona más potente del acuífero y oblicuo entre el caz de recarga y la captación más somera (P-20), entre las que el rango de variabilidad es mayor.

La distribución del ión **nitrito** es acorde con la tendencia generalizada, aumentando la concentración en zonas más potentes del acuífero. Las isolíneas presentan una distribución subhorizontal ligeramente oblicua.

La distribución del **hierro total** guarda cierta similitud con la de la conductividad, aumentando hacia la zona norte del acuífero (en este caso la de menor espesor). En general se aprecia una contribución positiva y consistente del ión hierro en la conductividad del agua.

El **oxígeno disuelto** presenta una tendencia idéntica a la del ión hierro. En este caso aumenta en la zona menos potente del acuífero, disminuyendo con la profundidad y con la lejanía al caz de recarga, ya que en este caso el alejamiento es oblicuo.

– Perfil 14

El perfil 14 ha sido realizado con orientación este-oeste, perpendicular al caz, en el paraje de *Los Navazales*. Los puntos de agua empleados corresponden a los pozos someros P-23 y P-24, muestreados a 3,1 y 3,6 m respectivamente. El carácter hipodérmico de los pozos y la carencia de captaciones de mayor profundidad en el sector impide el trazado de isolíneas para la totalidad del espesor saturado del acuífero.

En general se aprecia un gradiente importante entre el caz de recarga y las captaciones muestreadas, que, a pesar de encontrarse muy cerca, presenta variaciones composicionales importantes.

La **conductividad** tiende a aumentar de este u oeste, si bien no hay datos disponibles que corroboren su aumento con la profundidad. En general se aprecia un incremento a medida que aumenta el espesor y el espesor saturado del acuífero.

La distribución del ión **nitrito** presenta una distribución opuesta, aumentando más hacia el este, donde el acuífero es ligeramente más potente. En este sector parece haber un gradiente hidráulico dirigido que bordea el Cuerno de la Revilla por el sur, si bien existe una nueva divisoria hidrogeológica en las inmediaciones. El caz de recarga tiende a

disminuir esta concentración por dilución directa, generando isocoras centrífugas en torno al caz en la zona más superficial.

La distribución del **hierro total** es coincidente con las isolíneas de nitratos, con una variación brusca y muy superior en el extremo este que en el oeste.

El **oxígeno disuelto** oscila entre 5,1 y 7,8. el valor más bajo es el del caz de recarga, y el más alto en el extremo derecho del perfil.

El ancho intervalo de variabilidad está motivado por el desarrollo diferencial de formaciones aluviales relacionadas con el trazado del arroyo de la Ermita, con mayor anchura en el sector derecho del perfil (este) que en el izquierdo. Se aprecia una mayor concentración en los tres iones analizados, pero no en la conductividad.

– Perfil 15

El perfil 15 es oblicuo al caz de recarga, y ha sido trazado en las inmediaciones de la cabecera, en captaciones cercanas a la confluencia de la cacera de aguas residuales de Santiuste con el dispositivo de AR. Une el piezómetro P-25, muestreado a 7 metros, con el pozo P-26, donde se han extraído y analizado dos muestras a 8,8 y 13 metros de profundidad.

Se traza del perfil con mayor incidencia de contaminación orgánica constatada de los realizados.

En general se aprecia un fuerte gradiente entre las aguas de recarga y las aguas subterráneas de ambos puntos para la mayoría de los parámetros determinados.

La **conductividad** presenta un gradiente con isolíneas centrífugas en torno al caz de recarga y subhorizontales en la zona saturada, con un ascenso proporcional a la profundidad.

La distribución del ión **nitrato** aumenta con la profundidad, de manera más intensa en la zona de acuífero menos potente pero más cercana al punto de vertido de aguas residuales. Se aprecia un ligero incremento entre los 8,8 y 13 metros. En otras captaciones se ha detectado un descenso a medida que aumenta la profundidad desde aproximadamente el intervalo entre 15 y 20 m.

La distribución del **hierro total** guarda bastante similitud con la de la conductividad, aumentando en la zona de mayor contaminación con un gradiente más acusado que en el extremo contrario del perfil, donde se registra un espesor de arenas superior.

El **oxígeno disuelto** presenta isocoras subverticales, aumentando desde la zona más potente del acuífero hacia la zona más contaminada entre 3,8 y 5,9 ppm. Esta analítica resulta chocante con la DBO esperada, ya que el pozo más cercano al punto de vertido presenta una concentración de oxígeno ligeramente más alta. No hay variaciones en la vertical en el intervalo de muestreo.

Los perfiles elaborados permiten deducir las siguientes cuestiones:

A tenor de los resultados obtenidos, son constatados muchos de los rasgos hidrogeológicos ya detectados, como son las divisorias de aguas subterráneas y la presencia de anomalías en zonas de lineamientos condicionados por la tectónica.

La conductividad en general aumenta con la profundidad y con la salinidad.

La presencia de nitratos está asociada a las zonas más potentes del acuífero, paleo cubetas, donde hay fenómenos de reciclaje de aguas subterráneas. En general, se percibe un aumento con la profundidad hasta cerca de los 20 metros, a partir de donde la tendencia es descendente.

El hierro contribuye de forma general a la conductividad de manera consistente. Se han detectado zonas del acuífero con concentraciones muy altas, especialmente en la zona de confluencia de los principales cauces fluviales. Presenta variaciones importantes a los lados de las divisorias hidrogeológicas detectadas.

El oxígeno disuelto oscila entre límites estrechos. La orientación de las isocoras está condicionada por la posición relativa del perfil con el caz de recarga, si bien, la morfología del trazado es variable. Se han detectado casos con trazados subhorizontales, oblicuos y subverticales. En ocasiones la concentración es más alta en el acuífero que en el agua del caz, lo que denota un proceso de aireación importante y acumulativo. También parece haber un retardo importante entre el final del período de recarga y el final del proceso de desaireación del acuífero.

Las isocoras han permitido detectar zonas de contaminación puntual, que en algunos casos coinciden con la presencia de granjas porcinas en la zona.

También se han detectado zonas del acuífero donde predominan las condiciones oxidantes, hecho que debe ser tenido en cuenta a la hora de planificar las operaciones SAT en futuros ciclos de recarga, con objeto de evitar el precipitado de procesos incrustantes y colmatantes.

En vista de los resultados, los procesos contaminantes implicados en la zona de estudio adquieren un cierto protagonismo al haberse detectado fenómenos que se oponen a la tendencia general deducida en la zona.

Aunque su localización parece estar bastante bien definida, su naturaleza no tanto. En el siguiente apartado se analiza la naturaleza de los procesos contaminantes detectados en la zona de estudio.

5.3.6. *Humedales del Complejo de Coca-Olmedo*

La escasez de datos del período preoperacional y la disponibilidad de mediciones de parámetros exclusivamente inestables en el postoperacional presenta ciertas dificultades para establecer pautas de reacción.

El análisis de los datos iniciales desprende los siguientes resultados:

A partir del análisis de aguas completo del humedal permanente “*Los Majuelos*”, n.º 19 del inventario, las aguas son clorurada y sulfatada sódica y potásica. El resultado del cálculo desvela la presencia de las fases minerales tipo halita, silvita y anhidrita junto con una fuente de sílice importante (cuarzo o feldespatos).

En análisis del humedal n.º 46 del inventario y su posterior modelización indica la presencia de halita, silvita, dolomita y anhidrita en el sistema.

Como rasgos destacables en ambos, cabe mencionar el alto intervalo de variabilidad en cuanto a conductividad, de 2.050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el humedal 46 a 8.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el n.º 19 en los análisis realizados en agosto de 2003. Éste último se encuentra más alejado del borde del acuífero y a una distancia de casi 5,5 km del anterior “*aguas abajo*” según la dirección de las líneas de flujo de las aguas subterráneas.

La concentración de nitratos en las aguas también oscila entre límites anchos. Mientras en el primero de los humedales, situado ligeramente más alto que los cultivos de los alrededores, la concentración en nitratos es muy baja (2,5 mg/l), así como la de amonio (0,33 ppm), en el humedal 46 excede los 120 mg/l. Estas cifras entran en consonancia con la concentración de carbonatos en el sistema, que es de 0 y 318 ppm en el mismo orden (datos analíticos de agosto de 2003). Este hecho es indicativo de un ambiente reductor puntual en el humedal más alejado de los regadíos, y de la presencia de reacciones de desnitrificación y alcalinización en las aguas más salinizadas, como corresponde a humedales endorreicos puros. En estos ambientes es previsible hallar metano disuelto en las aguas (*Bubier & Moore, 1994*). En cambio, los humedales con concentraciones en nitratos menores están en general asociados a cauces fluviales, perteneciendo a la tipología de humedales 3 y 4 de García Rodríguez, 2003 (en Bloque 1, Apto. 3.1.3.).

La concentración de nitratos en los **humedales**, dado su funcionamiento endorreico y el hecho de estar rodeados por cultivos, resulta también muy elevada. Se han medido concentraciones de 2 mg/l en el humedal 19 de Llano de Olmedo, y de hasta 126 mg/l en el humedal 46 de Ciruelos de Coca. Este rango de variabilidad está condicionado en gran parte por argumentos topográficos y por el carácter reductor de las aguas en el primero de los humedales (el inventario de humedales se presenta en el Bloque 4, Anexo 4.1).

También resulta relevante la alta influencia de las zonas regables en la concentración de nitratos, que alcanza concentraciones muy altas (hasta 284 mg/l en el sector septentrional oriental del acuífero).

El sodio también oscila entre límites anchos, aumentando con el período de residencia. En las muestras analizadas la concentración es de 112 y 970 ppm respectivamente de sur a norte.

Otro hecho relevante es la elevada concentración de sílice en el sistema, a pesar de ser humedales desarrollados sobre facies Cuestas. La escasez de sílice en el suelo induce a pensar que se trata de sílice originaria de los primeros estadios de envejecimiento de esta agua.

Si bien no se trata de polos fríos del sistema propiamente dicho, se han determinado los parámetros inestables de todos los humedales del Complejo de lagunas salinas de Coca-Olmedo con lámina de agua durante el verano de 1999, 2002 y 2003. También se han muestreado y analizado en laboratorio dos humedales del sistema.

En ellos se ha llevado a cabo la medición de los parámetros inestables conductividad, salinidad, TSD, pH y temperatura. Los humedales medidos han sido (Tabla 3.75):

N.º	NOMBRE	LOCALIDAD	X	Y	Z	SUSTRATO	fecha
12	Bodón Guarrero	LLANO DE OLMEDO	364467	4571575	757.0	SALINO	jun-99
17	La Cárcaba (con b)	LLANO DE OLMEDO	365458	4570158	762.6	Q-ARENOSO	jul-03
19	Los Majuelos	LLANO DE OLMEDO	364390	4570049	778.2	Q-ARENOSO	oct-03
23	Carcava Grande	AGUASAL	361753	4570906	758.0	SALINO	oct-03
27		AGUASAL	361671	4570562	759.0	SALINO	oct-03
28	Carcava Chica	AGUASAL	361733	4570619	759.0	SALINO	oct-03
45		CIRUELOS DE COCA	367263	4565494	794.9	SALINO	ago-03
46		CIRUELOS DE COCA	367272	4565455	794.8	SALINO	jun-99
49		CIRUELOS DE COCA	367354	4565070	795.6	SALINO	ago-03
57	Laguna de las Eras	VILLAGONZALO DE COCA	367434	4562545	798.1	SALINA	ago-03
66	Bodón de la Hiruela	SANTIUSTE DE SAN J & B	368426	4559078	802.6	SALINA	ago-03
67	Humedales de Bernuy	SANTIUSTE DE SAN J & B	366880	4558862	815.4	SALINA	ago-03

Las determinaciones se presentan en la Tabla 3.76:

HUM-N.º	NOMBRE	C μ S/cm	PH	SAL %	TSDppm	fecha
12	Bodón Guarrero	12000	9.0			jun-99
17	La Cárcaba	1822	8.74	3.6	913	jul-03
19	Los Majuelos	13040	9.01			oct-03
23	Cárcava Grande	13180	9.73			oct-03
27		1130	7.86			oct-03
28	Cárcava Chica	3900	9.23			oct-03
45		1298	8.11	2.5	650	ago-03
46		2040	8.1			jun-99
49		2036	8.08	4.0	1016	ago-03
57	Laguna de las Eras	23660	9.1	46.2	11830	ago-03
66	Bodón de la Hiruela	3080	8.62	6.1	1152	ago-03
67	Humedales de Bernuy	2368	8.85	4.6	1183	ago-03

Tablas 3.75. y 3.76. Inventario y determinación de parámetros inestables en los humedales del Complejo clasificados como "azules" con lámina de agua en verano de 2003.



Los **rangos térmicos** observados en las muestras de este grupo de humedales eran dependientes de la hora y fecha de medida, sin que se hayan detectado peculiaridades especiales. Las determinaciones fueron realizadas en el período estival y la temperatura del agua oscilaba entre 14°C para el humedal 57 y 25°C en el n.º 12.

Los valores de la **conductividad *in situ*** varían entre 1.130 µS/cm en el humedal n.º 23, y los 23.660 µS/cm en el 57. La conductividad media es de 6.630 µS/cm.

En cuanto a la determinación del **pH *in situ***, el rango oscila entre los valores de 7,86 para el humedal n.º 27, y de 9,73 para el punto n.º 23, lo que corresponde a unas facies básicas. La media de los valores cuantificados en el campo es de 8,70.

Los valores de salinidad y de sólidos disueltos guardan una estrecha relación con la conductividad.

En cuanto a los análisis de macroconstituyentes, solo se ha podido obtener en dos humedales seleccionados por su tipo de funcionamiento y ubicación.

El primero es el humedal n.º 19, *Los Majuelos*, situado en la margen izquierda de la carretera de Llano de Olmedo a Aguasal. En él se ha detectado un ambiente salino y simultáneamente reductor.

El segundo corresponde al humedal 46, en Ciruelos de Coca, donde se han detectado procesos ascendentes de flujo de aguas de circulación regional fuertemente mineralizadas. La importancia del humedal radica en que presenta un pozo en su interior que en ocasiones presenta el nivel freático más alto que el agua del humedal, lo que induce a pensar que está conectado con flujos ascendentes de circulación regional de acuerdo con un modelo conceptual de tipo Tóth.

El estudio de su analítica corroborará esta hipótesis.

El análisis estadístico multivariante mediante presenta el inconveniente de la escasa disponibilidad de datos, no obstante se han elaborado las matrices de correlación para obtener una caracterización lo más completa posible.

Del análisis químico de macroconstituyentes se han obtenido los siguientes resultados (Tablas 3.77 a 3.79) en mg/l, y en meq/l (Tablas 3.80 a 3.82):

• **Análisis estadístico multivariante**

N.º	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef.Var %
Na	112.0	972.0	542.0	608.112	112.198	88.0
Ca	110.0	217.0	163.5	75.66	46.275	49.0
Mg	129.0	451.0	290.0	227.688	78.513	71.0
Cl	145.0	2139.0	1142.0	1409.971	123.465	93.0
SO4	222.0	1373.0	797.5	813.88	102.054	84.0
pH	8.1	8.74	8.311	8.364	100.626	7.0
K	11.0	1148.0	579.5	803.98	138.737	99.0
Cond	1870.0	8790.0	5330.0	4893.179	91.804	79.0
HCO3	580.0	775.0	677.5	137.886	20.352	25.0

Tabla 3.77. Humedales de Complejo de Coca-Olmedo con determinaciones analíticas. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en mg/l.



Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	0.0	96.07	87.07	-114.68	72.1	8.02	968.79	-137.07	554.6
CA		0.0	-202.03	-1.9E+3	-961.27	7.44	-5.2E+3	-1.2E+3	379.53
MG			0.0	-653.84	-239.11	7.84	-902.3	-444.51	501.88
CL				0.0	138.3	8.05	1.4E+3	-71.68	565.82
SO4					0.0	7.98	535.3	-208.3	542.39
PH						0.0	-8.6E+4	-1.4E+4	-1.9E+3
Cond							0.0	-296.25	527.3
K								0.0	578.11
HCO3									0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	1.0	0.124	0.374	2.32	1.34	7.4E-4	8.05	1.32	0.227
CA		1.0	3.01	18.64	10.76	6.0E-3	64.67	10.63	1.82
MG			1.0	6.19	3.57	2.0E-3	21.49	3.53	0.606
CL				1.0	0.577	3.2E-4	3.47	0.57	9.8E-2
SO4					1.0	5.6E-4	6.01	0.988	0.169
PH						1.0	1.1E+4	1.8E+3	304.69
Cond							1.0	0.164	2.8E-2
K								1.0	0.172
HCO3									1.0

Tabla 3.78. a 3.79. Matrices de correlación con expresión del punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en mg/l.

Expresión en meq/l:

N.º	Mín	Máx	Media	Desv. St.	Desv.Típ.	Coef. Var %
Na	4.872	42.279	23.575	26.451	112.198	88.0
Ca	5.489	10.828	8.159	3.775	46.275	49.0
Mg	10.613	37.104	23.858	18.732	78.513	71.0
Cl	4.09	60.333	32.212	39.77	123.465	93.0
SO4	4.622	28.587	16.605	16.946	102.054	84.0
pH	8.1	8.74	8.311	8.364	100.626	7.0
Cond	1870.0	8790.0	5330.0	4893.179	91.804	79.0
K	0.281	29.361	14.821	20.562	138.737	99.0
HCO3	9.507	12.703	11.105	2.26	20.352	25.0

Tabla 3.80. Análisis estadístico multivariante de las muestras. Concentración en meq/l.

Punto de corte con el eje Y:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	0.0	4.79	7.16	-3.23	1.5	8.02	968.79	-3.51	9.09
CA		0.0	-16.62	-53.73	-20.01	7.44	-5.2E+3	-29.61	6.22
MG			0.0	-18.44	-4.98	7.84	-902.3	-11.37	8.23
CL				0.0	2.88	8.05	1.4E+3	-1.83	9.27
SO4					0.0	7.98	535.3	-5.33	8.89
PH						0.0	-8.6E+4	-367.75	-30.95
Cond							0.0	-7.58	8.64
K								0.0	9.48
HCO3									0.0

Pendiente de la recta de regresión:

	NA	CA	MG	CL	SO4	PH	Cond	K	HCO3
NA	1.0	0.143	0.708	1.5	0.641	1.7E-2	184.99	0.777	8.5E-2
CA		1.0	4.96	10.53	4.49	0.12	1.3E+3	5.45	0.599
MG			1.0	2.12	0.905	2.4E-2	261.22	1.1	0.121
CL				1.0	0.426	1.1E-2	123.04	0.517	5.7E-2



SO ₄	1.0	2.7E-2	288.75	1.21	0.133
PH		1.0	1.1E+4	45.44	4.99
Cond			1.0	4.2E-3	4.6E-4
K				1.0	0.11
HCO ₃					1.0

Tabla 3.81 a 3.82. Matrices de correlación con expresión del punto de corte con el eje Y y pendiente de la recta de regresión. Concentración en meq/l.

El coeficiente de correlación entre los distintos iones/parámetros es unitario habida cuenta de la escasez de datos.

El croquis de situación de los humedales se presenta en la cartografía a escala 1:110.000 de la Fig. 3.45.

• Clasificaciones de aguas

En cuanto a las facies hidroquímicas, la primera es clorurada y sulfatada sódico-magnésica y potásica, mientras que la segunda es bicarbonatada y sulfatada magnésico-cálcica y sódica.

- Humedal 19 LLano de Olmedo Na-Mg-K-Cl-SO₄
- Humedal 46 Ciruelos de Mg-Ca-Na-HCO₃-SO₄

Ambos tipos de aguas pueden ser consideradas “de mineralización especial”.

• Diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas

De acuerdo con su quimismo, estas facies no pueden ser agrupadas por familias, dada la gran divergencia composicional que poseen. Esta divergencia se hace patente a partir de la observación de los diagramas de *Piper-Hill-Langelier* y de *Stiff* que se presentan a continuación (Figs. 3.46 y 3.47 a y b).

Dada la carencia de datos, no se han realizado cálculos de índices hidrogeoquímicos ni cartografías de isocontenidos.

A tenor de estos resultados queda constancia de que las aguas presentan gran variabilidad composicional, se encuentran muy mineralizadas y envejecidas, han tenido un período de residencia del agua en el acuífero relativamente alto, correspondientes a flujos intermedios o profundos, con influencia además de las fases minerales localizadas en superficie y fuentes de contaminación puntual.



Fig. 3.45. Cartografía con la ubicación de los humedales que cuentan con información relativa a su quimismo. Escala 1:110.000.

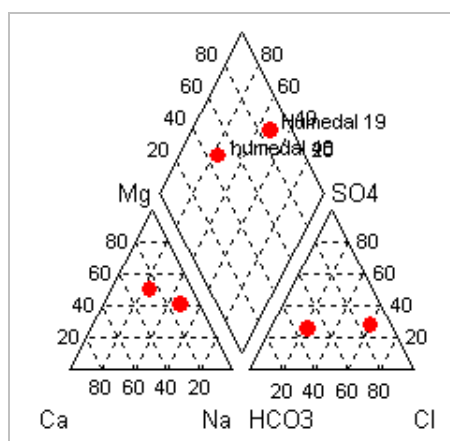
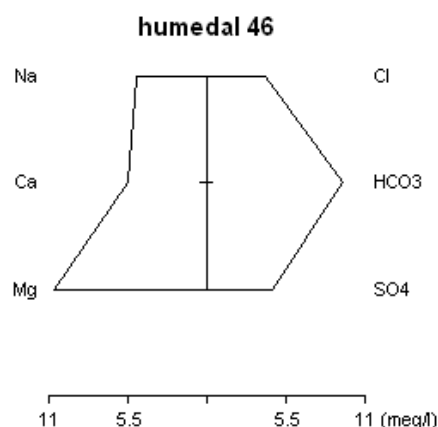
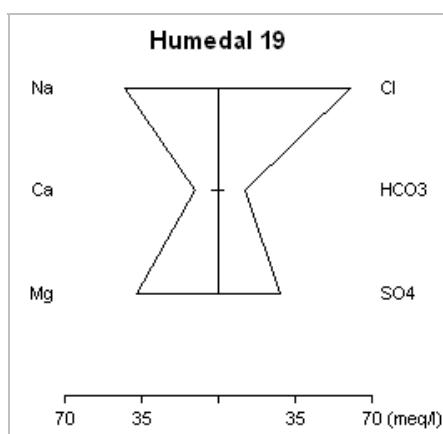


Fig. 3.46. Representación en un diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de aguas de los humedales.



Figs. 3.47 a) y b). Representación del análisis químico de las muestras de agua en diagramas de Stiff.

Esta variabilidad denota la amplia diversidad de facies hidroquímicas que previsiblemente hay en los distintos humedales del *Complejo*, introduciendo la necesidad de realizar estudios específicos previos a cualquier actuación para cada humedal.

En el próximo apartado se estudian las posibles variaciones cualitativas que experimentarían las aguas al ser mezcladas con las de recarga artificial, con objeto de contar con un criterio adicional para planificar alternativas de recarga y normas técnicas incorporables a un código de “*buenas prácticas*” apropiadas desde el punto de vista medioambiental.

En el Bloque 5 se describen dispositivos idóneos para la recarga artificial de estos humedales, basados en gran parte en esta analítica.

5.3.7. Los procesos contaminantes. Distribución y evolución previsible

La Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista, de acuerdo con la caracterización inicial de sus aguas subterráneas, presenta un grado de contaminación alto en algunos sectores. La corrección de este impacto representa uno de los objetivos de las operaciones de recarga artificial.

Los vectores contaminantes principales detectados se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Contaminación **puntual** originada por la presencia en elevadas concentraciones de elementos orgánicos (nitrógeno, fósforo), compuestos orgánicos (algas, etc.), bacterias y virus en zonas tales como la cacería de vertido de aguas residuales de la localidad, junto al punto de inicio del caudal de recarga, las inmediaciones de los puntos de enterramiento de animales (Sanchón, Betaya), etc. (*Galán et al, 2001b; Fdez. Escalante & López, 2002*).
- Contaminación **difusa** procedente de fuentes agrarias, en especial por concentraciones excesivas de nitratos y amonio. Estos iones se encuentran ampliamente distribuidos por el acuífero, tanto en su compartimento superficial como en el profundo, por descuelgue y reciclaje a través de los sondeos que intercomunican los distintos niveles en la horizontal. Se concentra además en zonas correspondientes a cubetas fosilizadas (*MAPA, 1999a, Galán et al, 2001b*). La zona es considerada vulnerable (o mejor dicho, “*vulnerada*”), debido a sus características (*MIMAM, 2001*).
- Contaminación **regional** por la presencia de metales pesados en concentraciones excesivas. El problema ha adquirido dimensiones importantes en el tratamiento del arsénico, detectado a nivel regional por encima de los límites de potabilidad (*Barroso et al, 2002*), así como el hierro y manganeso. Como consecuencia de este problema, en 2002 fue inaugurada una planta de tratamiento de aguas extraídas del río Eresma, aplicando la técnica del River Bank Filtration (RBF). Esta agua, una vez tratada, es distribuida por la mayoría de las localidades de la zona (*Barroso et al, 2002*) (Figs. 3.48 a y b).



Figs. 3.48 a) y b). Cartel informativo de la presencia de arsénico en las aguas subterráneas en concentraciones susceptibles de provocar arsenicosis.

- Contaminación de **origen natural** que se manifiesta como problemas de salinización puntual por cloruros en zonas de destacada intrusión salina continental (Galán et al, 2001b; Fdez. Escalante & López, 2002b). Estas zonas corresponden a los afloramientos de fases salinas asociadas a los humedales salinos del Complejo de Coca-Olmedo. Si el traslado de estas aguas a la zona regable puede representar un problema de contaminación, resulta necesario mantener estas concentraciones en los humedales, para preservar su estatus ecológico.

El estudio del grado de contaminación no representa uno de los objetivos de este proyecto de investigación, si bien, es necesario conocer las condiciones de contorno, con objeto de estudiar la evolución de los procesos contaminantes. Los iones que suscitan mayor interés son el nitrato, hierro y manganeso, así como el arsénico. Este último ión requeriría un proyecto de investigación específico, ya que no hay datos para la zona de estudio en la base de datos del IGME. Hasta la fecha no se ha logrado acceder a los datos relativos a la concentración de este metal pesado en las aguas subterráneas que obran en la CHD, ni ha sido viable proceder a su análisis.

En definitiva, los objetivos quedan reducidos a la caracterización de los procesos contaminantes en el acuífero y su distribución, así como prever su pauta evolutiva más probable tras las operaciones de recarga artificial.

La caracterización de las aguas subterráneas para la situación de 1999, presentada en el Apto. 5.3.2, coincide a *grosso modo* con los datos e interpretación que figuran en el trabajo del MAPA de 1999 (*en MAPA, 1999a*).

En el tratamiento de los datos disponibles de la Red de Control de la Hidroquímica (RCH) del MAPA, no son cuantificados con detalle los procesos contaminantes que afectan a los distintos sectores de la *Cubeta*, si bien, se presentan mapas de distribución de la conductividad, nitratos y cloruros, que han permitido detectar las zonas más contaminadas en el acuífero.

Como etapa previa al tratamiento de los datos, se considera procedente exponer un marco teórico relativo a estos iones contaminantes, de origen principalmente antrópico.

5.3.7.1. Contaminación por nitratos

El empleo de fertilizantes inorgánicos en la agricultura se remonta al último cuarto del siglo XIX, no obstante su utilización masiva no se inició hasta después de la Segunda Guerra Mundial.

En España, el consumo de fertilizantes nitrogenados en el período 1945-1990 se multiplicó por ocho, ocupando el quinto puesto en la Unión Europea en cuanto a consumo total de estos productos se refiere.

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, el consumo de fertilizantes nitrogenados en el año 2000 ascendió a 1.279 miles de toneladas de elemento fertilizante, siendo la Comunidad Autónoma de Castilla-León la mayor consumidora (33% del total) (*LBAE, 2000; MIMAM, 2001*).

En este contexto, la elevada concentración en ión nitrato en las aguas subterráneas se ha convertido en el mayor y más difundido problema de contaminación de las aguas subterráneas por actividades agrícolas en nuestro país. Esta problemática recibe la denominación genérica de “contaminación difusa”.

Su principal fuente de origen es el abonado animal o mineral, la presencia de granjas indebidamente aisladas y el vertido de aguas residuales.

La aplicación de fertilizantes genera un volumen de nitrógeno residual que no es asimilado por las plantas, cuya lixiviación y transporte le conduce hasta la zona saturada del acuífero y, en menor concentración, a los puntos de drenaje del mismo.

El límite de potabilidad para los nitratos en las aguas está establecido en 50 mg/l (*DOCE, 2000 –DM–*). A pesar de contar con aguas originarias que cumplan este estándar de calidad, resulta difícil prever la evolución de la contaminación difusa en el tiempo. La solución más factible pasa por minimizar la cantidad de fertilizantes a aplicar en zonas vulnerables.

Por ejemplo, la tasa de aplicación en Francia ha sido reducida en diciembre de 2002 de 210 a 170 kg/ha/año en zonas alejadas de captaciones para abastecimiento humano, proponiendo descender más todavía esta tasa en estos casos (*Delmolino, 2002*).

El desplazamiento del nitrato en las aguas subterráneas se produce por advección y disolución. Al ser una molécula relativamente gruesa, su migración está condicionada en gran medida por la granulometría del acuífero, y por su poder de autodepuración, que, en este caso, es relativamente alto.

Las técnicas de tratamiento adoptadas hasta la fecha se basan especialmente en la dilución de estos compuestos, si bien comienzan a implantarse las medidas tendentes a la denitrificación físico-química y biológica.

La primera consiste en la filtración físico-química a través de membranas de resinas, bien por ósmosis inversa o electrodiálisis (*Delmolino, 2002*). Estas membranas llevan a cabo la nanofiltración y además, son efectivas en la eliminación de pesticidas. Es preciso mantener las condiciones de temperatura y oxígeno disuelto, dada la alta sensibilidad del ión ante estos parámetros.

El efecto de estos filtros es la disminución del contenido en nitratos, reemplazándolo por cloruros en las aguas tratadas.

El residuo líquido generado (eluat⁴) presenta graves dificultades de eliminación, tendiendo a su tratamiento en plantas de incineración o mediante el reciclaje.

La necesidad de realizar frecuentes limpiezas de filtros y el mantenimiento de las condiciones térmicas óptimas, seguidos de procesos de desinfección con cloro u ozono, motiva que el proceso sea excesivamente caro (*Delmolino, 2002*).

La presencia de bacterias intervienen activamente en la reducción de nitratos a nitritos y a nitrógeno gas.

⁴ La definición de eluato aparece en el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (BOE 20-01-2002) como: “La solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio”.

El abonado en la zona se lleva a cabo siguiendo *códigos de buenas prácticas agrarias*, no obstante, en muchas ocasiones, la cantidad de abono sobrepasa con creces las recomendaciones técnicas, al representar un sistema de eliminación de los excedentes de purines de las granjas agrarias.

Generalmente se aplica “*por manta*”, a partir de acumulaciones superficiales de abono orgánico.

La implantación del principio “*el que contamina paga*” o su análogo “*el que contamina más, paga mucho más*” (LBAE, 2000; MIMAM, 2001) ha llevado al Ministerio de Medio Ambiente a implantar un punto de la Red de Control de Nitratos en las aguas subterráneas, dentro del programa de determinación de “zonas vulnerables” (MIMAM, 2001). Se trata del punto N-91, localizado al sureste de Villeguillo, zona donde se desarrolla la mayor actividad agrícola de la zona tras la concentración parcelaria de este sector, con prácticas intensivas de cultivo de fresón y hortalizas.

Este punto fue perforado en una *Cubeta* colmatada por arenas en la que se ha verificado que existe un drenaje del acuífero hacia el río. La profundidad del piezómetro es de 37 metros.

Se ha estudiado la distribución de los nitratos en el acuífero, elaborando cartografías de isocontenidos para la situación pre y operacional. A primera vista se aprecia una distribución relativamente homogénea, en gran parte relacionada con el uso de abonos minerales y con el reciclado de las aguas usadas para riego, la cual se ve favorecida a su vez por la alta permeabilidad de la formación arenosa eólica.

En vista de la escala y del rango de variabilidad, queda patente la inaptitud de la mayor parte de las aguas del acuífero para determinados usos, especialmente el abastecimiento, al menos en el período preoperacional y operacional.

La distribución de isolíneas es bastante homogénea y guarda cierto paralelismo con los cauces del Eresma y Voltoya. Estos contenidos también son debidos, en gran medida, al reciclado de las aguas subterráneas utilizadas para riego a través de los estratos superiores (Galán *et al*, 2001a).

La concentración máxima está situada entre las localidades de Ciruelos de Coca y Coca, zona donde la *Cubeta* presenta una fuerte reducción en anchura, así como en las inmediaciones de la cacera de Santiuste de San Juan Bautista. Suelen aparecer en mayores concentraciones en las paleocubetas o zonas más potentes del acuífero cuaternario, dada la abundancia de captaciones en ellas y el efecto de reciclaje.

La morfología de las isolíneas sigue un comportamiento parecido al de los cloruros, lo que confirma la importancia de los focos de contaminación en la calidad hidroquímica de las aguas del acuífero superficial.

Hay además focos puntuales con valores de hasta 284 mg/l en el punto P-18 de la RCH empleada en el período preoperacional. Se trata de un sondeo profundo con un pH excesivamente básico (10,1) situado en el sector central del acuífero, y hasta 283 mg/l en el P-21, al noreste de Santiuste. Ambos puntos están perforados en zonas de intensa actividad consuntiva.

A lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación se ha realizado un inventario de granjas en la *Cubeta*, e incorporado como cobertura digital a los mapas de procesos contaminantes mencionados. Observando la distribución de las isocoras con respecto a la posición de las **granjas**, se aprecia que hay una cierta equiparación en sectores puntuales, como es la falda suroeste del afloramiento de margas terciarias del Cuerno de la Revilla y junto a la carretera de Santiuste a Nava de la Asunción, según se percibe en la cartografía “*Cubeta de Santiuste, cartografía de isocontenidos, ión nitrato*”, que se presenta en los Anexos 3.1.2.4 y 3.1.3.4. La figura sintetiza además la ubicación de las granjas inventariadas, las principales cubetas y los sondeos profundos con procesos de reciclaje constatados.

En las restantes zonas con elevada actividad agrícola (casi todo el área de estudio, exceptuando las extensiones forestales), se produce el **reciclaje** de las aguas de riego debido a la elevada permeabilidad de los estratos más superficiales. Este se lleva a cabo de forma natural (las aguas extraídas se infiltran como retornos de riegos, produciendo el lavado de la ZNS, alcanzando la ZS con concentraciones en este ión cada vez más elevadas).

El hecho del **reciclaje** de las aguas del acuífero a través de las captaciones profundas ha sido mencionado en la literatura hidrogeológica desde hace más de una década (IGME, 1988; IRYDA, 1990). Este hecho ha sido constatado, por haberse hallado sondeos profundos cargados en tritio y en nitratos, justificable por la mezcla de aguas subterráneas profundas y antiguas, sin tritio ni nitratos, con aguas subterráneas de estratos superiores con algo de tritio y contenido muy altos de nitratos (CEDEX, 1996).

El reciclaje de las aguas ha sido constatado al menos en cuatro **sondeos** que intercomunican verticalmente el acuífero superficial con el infrayacente o incluso el profundo, dependiendo de su profundidad, con descuelgue de aguas desde el superior hacia los inferiores. El caudal de descuelgue calculado para los sondeos oscila entre 0,6 y 1,5 l/s (MAPA, 2003). Este reciclaje conlleva la distribución de compuestos nitrogenados desde los acuíferos superiores a los inferiores.

Otro importante evento es la asociación de fuertes concentraciones en nitratos con **cubetas** del acuífero colmatadas de arenas (Galán et al, 2001). Este hecho ha sido observado durante el seguimiento de las fases sin y postoperacional y en la mayoría de los perfiles hidroquímicos realizados.

La alta movilidad de las aguas subterráneas, condicionada por la alta permeabilidad, ha provocado concentraciones muy elevadas (hasta 378 mg/l de nitratos en el punto RCH-26) en zonas regadas. Este es el caso de los sectores de acuífero localizados bajo los **pinares**, zonas que no reciben abonado directo en ninguna ocasión. Por ejemplo, en el sondeo de investigación RCH-5 se ha detectado una concentración de nitratos de 271 ppm, estando localizados a unos 500 metros del campo cultivado más cercano “*aguas arriba*” según el gradiente hidráulico.

De todo esto se deduce que el nivel de contaminación alcanzado en la zona en su estado preoperacional es alto, su principal origen es antrópico y consuntivo.

El primer ciclo de recarga no ha sido suficiente para diluir la gran cantidad de procesos contaminantes existentes, que han presentado un ligero ascenso durante los primeros meses del ciclo y una ligera disminución en la etapa postoperacional en los puntos de control más cercanos al caz de recarga artificial.

Este hecho está motivado por la movilización de los nitratos de la ZNS, inducida por la elevación del nivel freático de la recarga artificial cerca del caz de recarga, y por tratarse de un año hidrológico especialmente húmedo.

Su evolución previsible será estudiada de acuerdo con técnicas complementarias en los Aptdos. 7.3 y 7.5.

5.3.7.2. Contaminación por arsénico

La detección de arsénico en concentraciones apreciables en el agua subterránea representa un problema e impacto adicional a los ya presentados.

Se trata de un elemento metálico altamente nocivo. Su ingestión causa graves perjuicios al sistema nervioso central, al aparato respiratorio, dolores musculares, pérdidas de apetito, náuseas, inflamación de las mucosas, lesiones cutáneas e incluso tumores malignos (*Battaglia, 2002*). Estas consecuencias se han agrupado bajo la denominación genérica de “arsenicosis”.

La presencia de arsénico en las aguas subterráneas es en diversas formas, siendo las más abundantes los derivados alquílicos como sales (arsenitos o arseniatos), o ácidos [ácido monometilarsónico (MMA) o dimetilarsínico (DMA)].

Suele aparecer en altas concentraciones asociados a zonas con anomalías geotectónicas, por lo que su distribución presenta una alta heterogeneidad, aunque su distribución areal sea clara en los puntos de agua de profundidad superior a 300 m (*Barroso et al, 2002*).

Las oscilaciones del nivel freático y la entrada de aire en el acuífero induce procesos de oxidación de la fase más estable, liberando sales a las aguas subterráneas.

En forma de ácido ha aparecido asociado a procesos contaminantes orgánicos, integrándose partículas en forma de sal o ácido en moléculas orgánicas tipo gel. De ahí la importancia de estudiar la vinculación del MMA y DMA a terrenos con presencia de granjas y altos índices de abonado orgánico.

El comportamiento del arsénico en las aguas subterráneas parece difundirse con cierta facilidad por advección y disolución, dependiendo de la fase mineral (*Battaglia, 2002*).

El tratamiento más empleado es la utilización de lechos bacterianos autótrofos tipo *Thiomonas* o bacterias sulfato reductoras, capaces de transformar el arsénico (III) a arsénico (V), al extraer el oxígeno necesario para su actividad. Alternativamente se puede llevar a cabo una oxidación química.

Además del tratamiento con lechos bacterianos, el As (V) puede ser extraído en una segunda etapa mediante un proceso trifásico: coagulación con sales de aluminio y hierro (cloruro férrico o permanganato potásico), adsorción mediante una columna de óxido de aluminio y coprecipitación al producir la decarbonatación de sales de hierro y manganeso (*Battaglia, 2002*).

En el presente estudio no se han realizado determinaciones específicas de arsénico en las aguas subterráneas. No obstante se ha revisado la literatura hidrogeológica para ver su vinculación con operaciones de recarga artificial.

La máxima concentración de arsénico en las aguas subterráneas en una zona regable con aplicación de estiércol se produce entre los 17 y 25 metros (*Böhlke, 2002*). En torno a 15 metros existe un ambiente hidroquímico desnitrificante de al menos dos metros de espesor.

Este ambiente geoquímico coincide con la máxima concentración en sulfatos, derivada de los procesos de oxidación de los sulfitos. A una profundidad ligeramente inferior aparece la máxima concentración en arsénico (21 m), relacionada con la oxidación de minerales sulfurosos y liberación de metales pesados en disolución (*Van Beck et al, 1989*).

La evolución de la concentración de los iones nitrato, sulfato y del metal arsénico con la profundidad se presentan en las figuras adjuntas (Fig. 3.49).

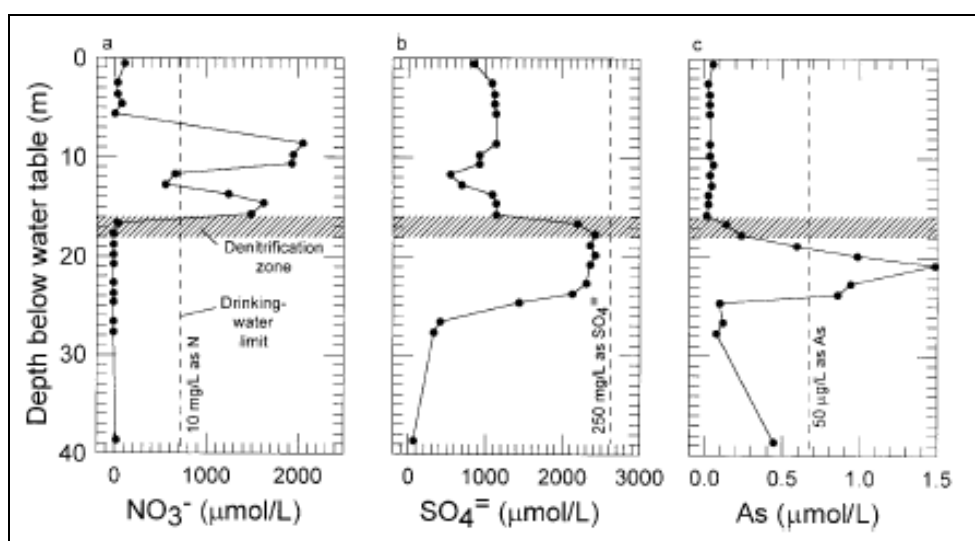


Fig. 3.49. Relación entre la profundidad de las aguas subterráneas y la concentración en nitratos, sulfatos y arsénico en una zona regable abonada con estiércol. Las líneas verticales discontinuas muestran el límite de potabilidad en USA. La zona sombreada corresponde a la zona de desnitrificación (Tomado de *Böhlke, 2002*, modificado por *Van Beck et al, 1989*).

5.3.7.3. Contaminación por vectores orgánicos

La presencia de vectores orgánicos en las aguas puede representar una serie amenaza para la población. Haciendo algo de historia, cabe destacar la epidemia de enterovirus en el agua subterránea en Taiwán, con presencia de al menos 67 tipos de

enterovirus diferentes en 1998, cuyo grado de nocividad llegó a infectar a 300.000 personas y sus efectos mataron a 85 niños (*Jiin-Shuh Jean, 1999*).

Aunque el origen no fue bien esclarecido, parecía estar relacionado con el enterramiento de cerdos infectados. En los procesos asociados a su descomposición se produjo un aumento de la temperatura y la aparición de nitritos en las aguas. La presencia de Selenio y otros elementos traza parece estar vinculada con el fenómeno.

Tal horrible circunstancia llevó al nacimiento de la rama de la ciencia conocida como “*hidrogeología biomédica*”, muy a tener en cuenta en operaciones de recarga artificial en acuíferos con presencia de procesos contaminantes orgánicos.

El problema se agrava cuando son detectados elementos en las aguas de elevada toxicidad, cuyo efecto nocivo se produce por debajo de los límites de detección que permite la ciencia en la actualidad, como es el N-nitrosodimetilamina. Este compuesto parece ser generado como consecuencia de la desinfección producida por cloración en aguas de recarga en ambientes poco conocidos. El compuesto tiene riesgo de cáncer y su estándar de potabilidad es de 10 µg/l, que queda por debajo del límite de detección normal en laboratorio (*Asano, 2002*).

Esta circunstancia conlleva el control minucioso de los procesos colmatantes de origen biológico durante el desarrollo del programa de vigilancia y control de las labores de AR, así como para planificar las opciones SAT más adecuadas para cada tipo de acuífero.

5.3.7.4. Contaminación manifestada por conductividades altas

Se trata de un parámetro que con frecuencia presenta altos niveles, como consecuencia de procesos contaminantes.

Resulta especialmente relevante en casos de contaminación salina por intrusión salina continental, si bien suele presentar niveles elevados por la presencia de otras tipologías contaminantes.

El estudio de las cartografías de isocontenidos para la situación preoperacional (1999), operacional (febrero de 2003) y postoperacional (julio de 2003), presentados en los Anexos 3.1.2.4, 3.1.3.4 y 3.1.4.3, han posibilitado ubicar zonas y focos con problemas de contaminación salina en el entorno preoperacional, y su evolución durante y después del primer ciclo de recarga.

La distribución de la conductividad del agua en el acuífero en la etapa preoperacional presenta valores máximos en las inmediaciones de las lagunas salinas desecadas cercanas a Ciruelos de Coca, en el extremo noroeste de la zona de estudio, así como en la zona de la *Cubeta* más próxima a Villagonzalo de Coca (donde se registran valores cercanos a 1.500 µS/cm, y en las inmediaciones de la cacera de vertido de aguas residuales de Santiuste, donde las aguas presentan valores en torno a 1.100 µS/cm entre 1999 y 2003, como consecuencia del vertido directo de aguas residuales a un acuífero en explotación y en recarga respectivamente.

En general, la distribución de la conductividad resulta más o menos lineal y semiparalela al trazado del arroyo de la Ermita, lo que induce a pensar que las operaciones de recarga artificial están condicionando de manera directa este parámetro.

En febrero y agosto de 2002 las isolíneas presentan una morfología similar en cuanto a distribución, si bien hay variaciones importantes en la magnitud, en general en sentido descendente. Las isolíneas son desplazadas bilateralmente desde el caz de recarga en la zona meridional. En la zona septentrional su evolución no queda tan clara.

En los Anexos 3.1.2.4, 3.1.3.4 y 3.1.4.3 se presentan las cartografías denominadas “*Cubeta de Santiuste, cartografía de isoconductividades*”, donde se puede observar la variación de la distribución de la conductividad entre 1999 y 2003 (fases pre, sin y postoperacionales).

5.3.7.5. Contaminación por cloruros

En cuanto a la distribución de la concentración de cloruros, presentan bastante analogía con la conductividad, manifestando una relación directa y estrecha entre ambos parámetros.

Las zonas de mayor concentración se sitúan entre Ciruelos de Coca (coincidiendo con el Complejo lagunar de Coca-Olmedo), donde se registran concentraciones del orden de 3 meq/l, y también en el entorno del punto de vertido de aguas residuales de Santiuste, con valores en torno a 2,1 meq/l. En general hay un gradiente descendente de oeste hacia el este en el sector meridional durante las fases sin y postoperacionales. Los restantes valores se sitúan por debajo de estos máximos.

Las isolíneas presentan paralelismo en torno al umbral central y son ortogonales u oblicuas a los cauces fluviales.

En los Anexos 3.1.2.4, 3.1.3.4 y 3.1.4.3 se presentan las cartografías de isocontenidos en ión cloruro, en las que se puede observar la variación de la distribución de la conductividad entre 1999 y 2003 (fases pre, sin y postoperacionales).

En este punto contamos con un grado de caracterización del acuífero suficientemente amplio para poder prever que procesos y reacciones son las más probables que ocurran durante y después de las operaciones de recarga artificial en la fracción agua, si bien es preciso conocer el otro componente de los procesos de interacción, el suelo.

Una vez caracterizados ambos componentes será más fácil acotar el rango de variabilidad de reacciones posibles, caracterizar ambientes hidroquímicos y conocer las reacciones más abundantes en cada lugar.

5.3.8. Pautas de reacción constatadas en la fracción líquida

Se ha estudiado la evolución hidroquímica de las aguas del acuífero aplicando las distintas metodologías descritas para las fases pre, sin y postoperacionales. Este estudio comprende procesos pretéritos que permiten deducir una serie de pautas de reacción de forma constatada, y cálculos orientados al futuro, que permiten realizar previsiones evolutivas aplicando códigos de modelación. En este apartado se resumen las pautas de reacción constatadas para los períodos pre y operacionales, postergando para el Apto. 7 las pautas evolutivas previsibles en el futuro.

Las herramientas hidroquímicas empleadas para el estudio de las pautas de evolución ya ocurridas en el sistema han sido definidas con anterioridad. De todas ellas y como tarea de interpretación ajena a la caracterización, se han estudiado las variaciones en índices hidrogeoquímicos y en cartografías de isocontenidos.

La disponibilidad de datos ha permitido calcular estos índices en las fases pre y operacionales, pero no ha sido posible realizar todavía un cálculo postoperacional por problemas de financiación.

Los resultados de ambas técnicas se presentan a continuación:

5.3.9. Variaciones en los índices hidrogeoquímicos y relaciones iónicas

Algunas de las relaciones iónicas calculadas pueden ser empleadas como indicadores de la evolución hidroquímica.

Los índices más empleados para el seguimiento de la evolución del acuífero durante las labores de recarga artificial son cuatro:

- Relación iónica Cloruro/Bicarbonato ($r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$).
- Relación iónica Sulfatos/Cloruros ($r\text{SO}_4/r\text{Cl}$).
- Relación iónica Nitratos/Cloruros ($r\text{NO}_3/r\text{Cl}$).
- Relación iónica Bicarbonato/Nitratos ($r\text{CO}_3\text{H}^-/r\text{NO}_3$).

Su tratamiento conjunto permite además determinar la posición de los ambientes reductores en el acuífero, el seguimiento de la desnitrificación y en general el rejuvenecimiento de las aguas como consecuencia de las labores de AR (Böhlke, 2002).

Los índices molales calculados para los distintos puntos de las redes de control en la etapa preoperacional y sionoperacional aparecen listados en las tablas del Anexo 3.2, expresados, en general, en meq/l.

– Relación iónica Cloruro/Bicarbonato ($r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$)

En situación preoperacional (julio de 1999) los valores de esta relación oscilan entre 0,13 y 1,27. El intervalo más normal en las aguas continentales se encuentran entre 1

y 5. Este índice está fuertemente condicionado por la litología del sustrato de cada captación.

En la fase operacional (febrero de 2003), los valores de la relación oscilan entre 0,09 y 0,72.

En general, el aumento del índice indica el avance del proceso de concentración de sales, por tanto, se aprecia un aumento de la salinidad desde la zona norte hacia el eje de la *Cubeta*, alcanzando valores máximos en las inmediaciones del vertido de aguas residuales de la cacería de Santiuste. Esta relación presenta una distribución similar a la del ión Cl.

Se trata de una relación cuyos resultados están de nuevo enmascarados por la presencia de sustancias contaminantes.

Aplicando el método de trabajo “en relativo” hay que tener en cuenta que ambos iones presentan tendencia de aumento de concentración con la conductividad, por lo que el empleo de esta técnica debe ser realizado confrontando dos o más relaciones iónicas.

– Relación iónica Sulfatos/Cloruros ($r_{SO_4/rCl}$)

Los valores de esta relación oscilan entre 2,91 y 0,06 en fase preoperacional.

En la fase operacional oscilan entre 0,37 y 2,70.

La contribución de ambos iones decrece a medida que aumenta la concentración de bicarbonatos y carbonatos.

Los valores mayores se sitúan en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, donde asociada a la salinidad de las lagunas desecadas persisten fuertes concentraciones de sulfatos.

A medida que aumenta la relación aparecen las aguas del extremo norte como más evolucionadas, de acuerdo con la validez del método.

Los valores menores se sitúan a medida que se avanza hacia el sur, con altos contenidos en cloruros de origen contaminante. Los mínimos están ubicados en los sondeos intermedios y profundos del tercio norte por lo general.

– Relación iónica Nitratos/Cloruros ($r_{NO_3/rCl}$)

Relación adecuada para el seguimiento del progreso temporal de los procesos de desnitrificación (*Böhlke, 2002*). Un descenso del índice resulta indicativo de la generación de condiciones reductoras, o de la incidencia de procesos de dilución y mezcla entre las aguas del acuífero y las procedentes de las operaciones de AR.

El índice puede ser empleado como indicador, de modo que los descensos del indicador a lo largo del tiempo conlleva procesos de disminución de la concentración de nitratos en el medio, acompañado en general por un aumento de la salinidad.

Las diferencias consecutivas son indicativas de la predominancia de un proceso o de ambos.

Los valores de esta relación oscilan entre 0,086 y 3,62 en fase preoperacional.

En la fase operacional oscilan entre 0,03 y 7,45.

– Relación iónica Bicarbonato/Nitratos ($r\text{CO}_3\text{H}^-/r\text{NO}_3$)

Al igual que el anterior, permite seguir el proceso de desnitrificación del agua subterránea como consecuencia de las operaciones de AR. Un aumento del indicador conlleva un rejuvenecimiento de las aguas subterráneas del acuífero en condiciones predominantemente oxidantes, dado que en ambientes reductores es más abundante la generación de carbonato.

Su ordenamiento y trabajo en absoluto para un único período no aporta información concreta. Se trata más bien de un indicador para medir y evaluar las variaciones a lo largo del tiempo. La disponibilidad de datos de la etapa preoperacional y operacional permiten establecer las condiciones de referencia, si bien sería preciso llevar a cabo comprobaciones a medida que se obtengan nuevos resultados en el futuro.

Los valores de esta relación oscilan entre 0,03 y 7,45 en fase preoperacional (Tabla 3.83).

En la fase operacional oscilan entre 0,35 y 87,14 (Tabla 3.84).

RCH 99	$r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$	$r\text{SO}_4/r\text{Cl}$	$r\text{NO}_3/r\text{Cl}$	$r\text{CO}_3\text{H}^-/r\text{NO}_3$
1	0.340	0.986	1.237	2.381
2	0.404	0.930	1.272	1.944
3	0.793	0.649	1.609	0.784
4	0.642	1.011	1.186	1.314
5	0.400	0.492	1.276	1.959
6	0.267	0.457	0.265	14.101
7	0.134	0.073	0.086	87.137
8	0.233	2.913	3.621	1.184
9	0.259	2.105	1.845	2.090
10	0.394	1.531	0.855	2.971
11	0.617	0.111	1.830	0.885
12	1.065	0.063	0.927	1.013
13	0.258	0.654	0.393	9.858
14	1.105	0.615	0.643	1.407
15	0.740	0.742	0.691	1.958
16	0.749	0.365	1.291	1.035
17	0.602	0.355	1.144	1.452
18	1.090	0.278	1.194	0.768
19	0.590	0.365	0.924	1.834
20	0.816	0.371	1.208	1.014
21	0.608	0.280	1.904	0.864
22	0.516	0.308	1.110	1.746
23	0.810	0.469	3.497	0.353

24	1.272	0.275	0.694	1.133
25	0.714	0.196	0.230	6.088
26	0.452	0.220	0.235	9.438
27	0.289	0.531	2.635	1.315
28	0.294	0.203	0.440	7.733

Tabla 3.83. Índices hidrogeoquímicos molales calculados para los puntos de la red de control RCH-1999 (etapa preoperacional).

RCH 03	rCl^- / rCO_3H^-	rSO_4/rCl	rNO_3/rCl	rCO_3H^-/rNO_3
rch 03-1	0.21	1.79	1.17	4.06
rch 03-2	0.45	0.88	1.10	2.03
rch 03-3	0.45	1.27	1.10	2.00
rch 03-4	0.52	0.87	1.30	1.47
rch 03-5	0.24	2.70	3.37	1.22
rch 03-6	0.09	0.58	0.08	130.07
rch 03-7	0.27	1.45	0.98	3.70
rch 03-8	0.53	1.88	0.38	4.98
rch 03-9	0.51	1.58	0.67	2.92
rch 03-10	0.21	2.50	1.12	4.36
rch 03-11	0.72	1.21	1.26	1.11
rch 03-12	0.49	1.42	1.44	1.41
rch 03-13	0.66	0.90	0.87	1.73
rch 03-14	0.39	0.76	0.32	8.04
rch 03-15	0.49	0.84	1.33	1.54
rch 03-16	0.33	1.33	1.12	2.68
rch 03-17	0.24	0.71	0.29	14.44
rch 03-18	0.44	0.58	0.33	6.98
rch 03-19	0.31	1.14	2.26	1.44
rch 03-20	0.37	0.47	0.21	12.83
rch 03-21	0.33	0.95	0.50	6.19
rch 03-22	0.25	0.66	0.34	11.72
rch 03-23	0.18	0.90	0.08	68.59
rch 03-24	0.27	0.42	1.23	2.98
rch 03-25	0.54	1.56	0.03	64.70
rch 03-26	0.24	2.04	7.45	0.55
rch 03-27	0.24	0.37	0.75	5.61

Tabla 3.84. Índices hidrogeoquímicos molales calculados para los puntos de la red de control RCH-2003 (etapa operacional).

Esta técnica debe ser empleada sobre una cartografía específica en la que estén representados los puntos de control, y viendo en qué orden avanzan o disminuyen las relaciones como indicadores de procesos de envejecimiento o rejuvenecimiento de las aguas, detectar cómo se están distribuyendo estos procesos en el acuífero.

El orden de los indicadores emparejado al rejuvenecimiento de las aguas es:

Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	rNO ₃ /rCl	rCO ₃ H-/rNO ₃
joven			
–	+	+	–
+	–	–	+
evolucionada			

Fig. 3.50. Ordenamiento hipotético según el progreso del rejuvenecimiento de las aguas de acuerdo con la relación iónica correspondiente.

La técnica permite además detectar zonas puntuales que presentan “irregularidades” y por tanto se oponen al correcto funcionamiento del método, como son los procesos contaminantes naturales y antrópicos, lentejones salinos, presencia de fugas de granjas o de conducciones de aguas negras, zonas con pozos sépticos, vertidos de animales muertos, etc. El ordenamiento de los datos para su estudio “en absoluto” se presenta en las Tablas 3.85 (preoperacional) y 3.86 (operacional).

rCl/rCO ₃ H ⁻	rSO ₄ /rCl	rNO ₃ /rCl	rCO ₃ H-/rNO ₃
7	8	8	23
8	9	23	18
13	10	27	3
9	4	21	21
6	1	9	11
27	2	11	12
28	15	3	20
1	13	16	16
10	3	5	24
5	14	2	8
2	27	1	4
26	5	20	27
22	23	18	14
19	6	4	17
17	20	17	22
21	19	22	19
11	16	12	2
4	17	19	15
25	22	10	5
15	21	24	9
16	18	15	1
3	24	14	10
23	26	28	25
20	28	13	28
12	25	6	26
18	11	26	13
14	7	25	6
24	12	7	7

	Sondeo/pozo de profundidad inferior a 75 m
	Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.
	Sondeo de profundidad superior a 150 m.

Tabla 3.85. Ordenamiento de las relaciones iónicas propuestas para el trabajo “en absoluto.” Fase preoperacional



rCl^-/rCO_3H^-	rSO_4/rCl	rNO_3/rCl	rCO_3H^-/rNO_3
rch 03-6	rch 03-5	rch 03-5	rch 03-26
rch 03-23	rch 03-10	rch 03-10	rch 03-11
rch 03-1	rch 03-26	rch 03-26	rch 03-5
rch 03-10	rch 03-8	rch 03-8	rch 03-12
rch 03-5	rch 03-1	rch 03-1	rch 03-19
rch 03-17	rch 03-9	rch 03-9	rch 03-4
rch 03-26	rch 03-25	rch 03-25	rch 03-15
rch 03-27	rch 03-7	rch 03-7	rch 03-13
rch 03-22	rch 03-12	rch 03-12	rch 03-3
rch 03-7	rch 03-16	rch 03-16	rch 03-2
rch 03-24	rch 03-3	rch 03-3	rch 03-16
rch 03-19	rch 03-11	rch 03-11	rch 03-9
rch 03-16	rch 03-19	rch 03-19	rch 03-24
rch 03-21	rch 03-21	rch 03-21	rch 03-7
rch 03-20	rch 03-23	rch 03-23	rch 03-1
rch 03-14	rch 03-13	rch 03-13	rch 03-10
rch 03-18	rch 03-2	rch 03-2	rch 03-8
rch 03-2	rch 03-4	rch 03-4	rch 03-27
rch 03-3	rch 03-15	rch 03-15	rch 03-21
rch 03-12	rch 03-14	rch 03-14	rch 03-18
rch 03-15	rch 03-17	rch 03-17	rch 03-14
rch 03-9	rch 03-22	rch 03-22	rch 03-22
rch 03-4	rch 03-6	rch 03-6	rch 03-20
rch 03-8	rch 03-18	rch 03-18	rch 03-17
rch 03-25	rch 03-20	rch 03-20	rch 03-25
rch 03-13	rch 03-24	rch 03-24	rch 03-23
rch 03-11	rch 03-27	rch 03-27	rch 03-6

	Pozo/sondeo de menos de 150 m de profundidad.
	Sondeo de profundidad superior a 150 m.

Tabla 3.86. Ordenamiento de las relaciones iónicas propuestas para el trabajo “en absoluto.” Fase operacional.

Aplicando el método de trabajo “en relativo” hay que tener en cuenta que ambos iones presentan tendencia de aumento de concentración con la conductividad. También se puede establecer una correlación con la relación iónica rSO_4/rCl , puesto que también el bicarbonato presenta la misma tendencia de aumento de concentración con la conductividad.

5.3.10. Variaciones deducidas del estudio de cartografías de isocontenidos

Como herramienta operativa para comenzar el estudio de las pautas de reacción que operan en el sistema y su distribución espacial, se han generado cartografías de diferencias entre iones y relaciones iónicas entre la etapa preoperacional y durante la recarga artificial.

Estas diferencias se han calculado mediante operaciones de álgebra de mapas, operando con la diferencia de concentración de los distintos iones en el espacio entre la



etapa previa y durante el primer ciclo de recarga de manera distribuida (mediante operaciones con grids o mallas).

La representación de estas diferencias permite apreciar las variaciones en determinados iones de manera distribuida en los diferentes sectores del acuífero, detectando así procesos hidroquímicos evolutivos prioritarios en el espacio o con cierta dependencia espacial.

Esta técnica constituye una herramienta efectiva y aplicada para la toma de decisiones sobre las actuaciones a llevar a cabo en el sistema durante los futuros ciclos de recarga artificial, ya que permite detectar zonas con procesos de magnesificación o decalcificación, precipitación de calcita, generación de condiciones reductoras, etc.

Los mapas generados corresponden a una situación hipotética sin entidad real, al tratarse de una técnica complementaria. En ellos se ha representado tramado y con líneas azules los valores negativos, es decir, aquellas zonas en las que ha habido un descenso relativo en un determinado ión, conductividad o relación iónica entre 1999 y 2003. La mayor parte de ellos son atribuibles a las operaciones de recarga artificial. Las isolíneas marcadas de negro corresponden a valores positivos, es decir, ese ión o entidad ha aumentado entre 1999 y 2003.

El mapa base empleado y el *bitmap* de fondo corresponden a la orografía.

Siguiendo el mismo orden de presentación de los apartados previos, las observaciones más destacables son:

– Distribución de conductividad del agua

El mapa hidroquímico correspondiente a la diferencia de las isolíneas de conductividad permite apreciar que ha habido un descenso generalizado de la conductividad del agua subterránea del acuífero superficial desde el verano de 1999 al invierno de 2003.

Los únicos sectores con valores positivos corresponden a la cabecera de la estructura de recarga, por influencia de la cacería de aguas residuales o bien como consecuencia de la presencia de una divisoria hidrogeológica, que delimita la zona de cabecera por el este. El límite sería una prominencia que funciona como umbral con elevación del relieve de la base del acuífero.

Las otras zonas sin variación relativa es el sector occidental de la *Cubeta*, junto a los afloramientos de facies Cuestas, al no haber influencia de las aguas de recarga en este sector, y en el extremo norte del área de estudio, ya que cuando se realizó el muestreo en febrero de 2003 estaba llegando el agua de recarga a este sector y comenzando a interaccionar con el acuífero.

– Distribución de la concentración de ión Cl^-

La disminución de la concentración en ión cloruro es generalizada en la *Cubeta*, a excepción de un pequeño sector localizado al este de la cabecera (desconectado hidrogeológicamente según se ha detectado en piezómetros cercanos), en el extremo occidental del sector meridional junto a la cabecera de la cadera de Betaya, zona que según todos los indicios tiene un fuerte componente tectónico, y en gran parte del sector septentrional excepto su extremo norte.

Las zonas con aumento de concentración presentan diferencias cuantitativas escasas (valor máximo de 1,62 meq/l en el sector sureste de Villeguillo, en la zona de cultivos de fresón con fuerte abonado agrícola).

– Distribución de la concentración de ión NO_3

El origen de este ión está asociado con la actividad agrícola de la zona. En general ha habido un descenso entre ambas mediciones en el sector meridional, excepto en su extremo occidental (humedales de Bernuy) y en toda la zona regable de Villeguillo desde el Pinar Nuevo de Ciruelos hasta la latitud del casco urbano de Villeguillo.

La zona con aumento de concentración alcanza la cifra de 3,4 meq/l, por tanto, la zona vulnerable de Villeguillo presenta una concentración de nitrato muy elevada.

– Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)

Esta cartografía presenta gran similitud con la de distribución de ión sodio. La cartografía realizada desvela que ha habido numerosas zonas en las que ha aumentado la concentración de iones alcalinos mientras que en otras ha disminuido. Las isolíneas azules indican sectores en los que ha habido un descenso en la concentración de iones alcalinos en las aguas subterráneas, mientras que las negras corresponden al proceso contrario.

El descenso máximo ha sido de 1,88, mientras que el ascenso ha sido de 2 meq/l. El promedio indica, en general, una disminución de sodio en el sistema y un aumento de potasio.

En la cabecera del caz de recarga hay un incremento de iones alcalinos, mientras que en el límite de la zona de influencia del bulbo de humidificación tienden a descender.

En sectores de escaso espesor del acuífero cuaternario hay un acusado descenso de ión sodio, que tiende a concentrarse en las cubetas del acuífero o zonas de máximo espesor de sedimentos cuaternarios.

El extremo occidental de la *Cubeta* presenta mayor concentración relativa de iones alcalinos, al recibir aportes por escorrentía de aguas de drenaje de las facies Cuestas y de la zona de humedales salinos.

La divisoria hidrogeológica transversal al eje de la *Cubeta* presenta un descenso de iones alcalinos, que incrementan a medida que aumenta el espesor del acuífero al sureste de Villeguillo. En este sector hay abundantes captaciones profundas que extraen aguas bicarbonatadas sódicas, que por retornos de riego y efecto reciclaje tienden a incrementar la presencia de iones alcalinos en el acuífero.

– Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)

El aumento de iones alcalinotérreos es generalizado en la *Cubeta* excepto en un sector puntual. La abundancia relativa de magnesio es mayor que la de calcio. El incremento alcanza los 9,5 mientras que el descenso sobrepasa ligeramente los 2 meq/l.

La zona con pérdida de iones alcalinotérreos en el sistema corresponde a la cabecera de la cadera de Betaya y a la divisoria hidrogeológica, sector donde se ha detectado la presencia de iones carbonato y donde ocasionalmente parecen concurrir reacciones típicas de un ambiente reductor en el seno del acuífero desde el inicio de la recarga artificial.

El sector localizado al oeste de Coca, a la altura de la confluencia del arroyo Balisa con el río Voltoya, presenta el domo principal a pesar de ser una zona de pinar.

– Distribución de la concentración de ión CO_3H^-

Como puede verse en esta cartografía hidroquímica, la tendencia general es muy concordante con la distribución de los iones calcio y magnesio. A estos hay que añadir un sector en el extremo meridional con disminución de iones bicarbonato y aumento de cloruros y puntualmente sulfatos aunque en baja magnitud. Hay que tener en cuenta que los datos disponibles de este sector son escasos.

La zona localizada al oeste de Coca presenta un espesor de acuífero bastante reducido en general.

– Distribución de ión sulfato $\text{SO}_4^{=}$

Existe un aumento en la concentración del ión $\text{SO}_4^{=}$ en todo el acuífero. Todas las muestras de agua presentan anhidrita en disolución, especialmente en el sector central del acuífero.

La única disminución se ha detectado inmediatamente al norte de la divisoria de aguas subterráneas cuyo trazado es parecido al de la carretera de Villagonzalo a Coca.

Los mayores ascensos se han detectado en la zona de influencia de humedales salinos.



5.3.11. Variaciones deducidas del estudio de cartografías de isorrelaciones iónicas

Se ha calculado la diferencia entre estas relaciones restando a los valores del año 2003 los de 1999. El resultado permite estudiar la distribución de estos índices en el acuífero y su variación relativa.

Las cartografías realizadas corresponden a las relaciones magnesio/calcio, potasio/sodio, cloruro/bicarbonato y sulfato/cloruro.

– Distribución de isorrelaciones iónicas magnesio/calcio

La distribución de esta relación presenta una clara distribución zonal, con un claro descenso en las unidades hidroambientales orientales y aumento en las occidentales.

El paralelismo de las isolíneas con el caz de recarga induce a pensar en la influencia rejuvenecedora de las aguas de recarga artificial en las aguas subterráneas del acuífero.

La variación positiva máxima es de 4,29 y la negativa de 1,13 meq/l. En general, la concentración de magnesio se ha incrementado en el acuífero.

– Distribución de isorrelaciones iónicas potasio/sodio

En general se aprecia un aumento del índice en la mayor parte del acuífero, excepto en la UHA meridional oriental, donde ha disminuido la relación por persistencia del ión sodio, al tratarse de una zona delimitada por una divisoria hidrogeológica de la cubeta principal. De este modo toda la zona situada al este y sur del “*Cuerno de la Revilla*” conserva concentraciones de sodio aunque de una cuantía limitada (su variación relativa es de 0,04 meq/l, mientras que el ascenso alcanza los 4 meq/l).

Las zonas con mayor aumento del índice se sitúan en el sector occidental.

En general se constata de nuevo el aumento generalizado de potasio en el sistema y la disminución de sodio por dilución de las aguas con aguas muy jóvenes de baja mineralización, como son las del río Voltoya en el período invernal.

– Distribución de isorrelaciones iónicas cloruro/bicarbonato

Esta relación iónica presenta una distribución concordante con la etapa previa, si bien se aprecia que la diferencia es negativa en la mayor parte de la *Cubeta*, existiendo una zona puntual donde ha aumentado, coincidente con un sector de máxima contaminación nitríca al sureste de Villeguillo.

Los máximos de concentran en el sector occidental de la *Cubeta*, en la zona de influencia de los afloramientos salinos asociados a los humedales de Bernuy y Villagonzalo de Coca.

– Distribución de isorrelaciones iónicas sulfato/cloruro

La cartografía presenta un aumento generalizado del índice en 2003 con respecto a 1999, siendo más bajo en las zonas de máxima concentración de nitratos y más alto en las zonas de mayor conductividad. El descenso de cloruros en las aguas es evidente, al igual que el aumento de sulfatos.

Por tanto, este índice puede ser considerado un indicador idóneo de la evolución hidroquímica de las aguas del acuífero, ya que recoge los dos aniones más implicados en la evolución del sistema.

5.3.12. Resultados

De acuerdo con las técnicas y herramientas empleadas para el estudio del sistema antes y durante las labores de recarga artificial, se deduce una serie de observaciones relacionadas con el funcionamiento hidrogeológico del sistema. Mediante estas técnicas se han obtenido datos y conclusiones que contribuyen a esclarecer algunas de las lagunas que quedaban en el conocimiento tras aplicar técnicas hidrogeológicas con menor componente hidroquímica.

En ellas cabe destacar el rejuvenecimiento generalizado de las aguas subterráneas tras mezclarse con aguas de mineralización muy baja en el acuífero.

La tendencia general es la de incrementarse la concentración en magnesio y potasio; los bicarbonatos apenas varían, mientras que se han generado en el sector central zonas con presencia de ión carbonato e indicios para pensar que en el medio hay zonas puntuales donde predominan las reacciones químicas reductoras.

El sodio, aunque tiende a disminuir relativamente salvo en zonas aledañas al Complejo de humedales de Coca-Olmedo, suele aparecer en altas concentraciones en los mismos sectores donde se concentran los domos de ión nitrato. Estas coinciden a su vez con zonas de gran espesor del acuífero y zonas regables con fuerte abonado.

Los valores de sodio son, en general, característicos de aguas poco sodificadas y aptas para el regadío. Una excepción la constituye el punto 8, en las afueras de Ciruelos de Coca, asociado a un sistema fluvial superficial y a una laguna salina desecada, de ahí su alta salinidad y las elevadas concentraciones de magnesio, potasio, cloruros, bicarbonatos y sulfatos que presenta.

Los valores de potasio son característicos de la litología asociada a las captaciones más superficiales, excepto para los puntos 8, 12 y 14 de la RCH-03. Todos ellos son pozos someros localizados en el sector septentrional central.

El contenido en calcio y magnesio es característico de arenas silíceas, si bien se aprecia un aumento relativo de magnesio en el sistema. Tan sólo se ha detectado calcita o aragonito en sobresaturación en cuatro de las 27 muestras, mientras que hay dolomita en 20 de las 27.

Los sulfatos aparecen con mayor abundancia en el sector norte del área de estudio, excepto en el punto 8, con valores altamente salinos. La presencia de anhidrita en disolución en las aguas es común para todas las muestras.

El hierro total aparece en concentraciones muy altas en la UHA septentrional oriental, en las inmediaciones de la confluencia de los ríos Eresma y Voltoya en Prado Cerrado. Este hecho puede estar motivado por variaciones en el origen de los sedimentos eólicos que recubren el paleorrelieve de este sector, con mayor abundancia en minerales de hierro, y, por ende, manganeso. Cabe también la posibilidad de que haya importantes concentraciones de arsénico, ya que ha aparecido asociado a fuertes concentraciones de hierro en otros sectores del acuífero (*Barroso et al, 2002*), si bien este extremo no está constatado.

Tan sólo se han detectado carbonatos en las captaciones 9 y 12 de esta profundidad.

En cuanto a los nitratos, hay una concentración máxima entre Ciruelos y Coca, así como en la zona regable del sureste de Villeguillo. En las inmediaciones de la cacera de aguas residuales de Santiuste de San Juan Bautista ha disminuido por dilución en el invierno de 2003, observándose valores muy altos en la etapa postoperacional del primer ciclo (en el verano de 2003). Según esto, la contaminación nítrica está condicionada en cierta medida por la estacionalidad, temperatura y movilidad en la zona saturada.

La contribución del ión nitrato en la conductividad es reducida en comparación a otros iones como el magnesio. Incluso el sodio presente a una escasa contribución en las captaciones más someras, según se deduce de la pendiente de las rectas de regresión obtenidas de los diagramas de dispersión.

La variación de la concentración en nitratos en profundidad presenta un gradiente descendente, hasta una profundidad aproximada de 15 metros en la zona saturada, a partir de la cual tiende a disminuir siendo compensada por iones salinos tipo sodio. Este hecho se detecta en las paleocubetas con cierta claridad y en las inmediaciones de la zona de vertido de aguas residuales de Santiuste.

La variación espacial de todos estos iones resulta fácilmente accesible a partir de la observación de los mapas de isolíneas (líneas que unen puntos de igual concentración de dicha sustancia). Estos mapas se presentan en los Anexos 3.1.2.4 y 3.1.3.4, “*Cartografía temática. Mapas de isocontenidos*” para el acuífero superficial.

De acuerdo con su quimismo, estas facies pueden ser agrupadas en una “familia” cuya principal característica es ser aguas jóvenes asociadas a un acuífero superficial de tiempos de residencia en el acuífero relativamente cortos. Esta similitud se hace patente a partir de la observación de hidrogramas.

Los puntos más representativos por presentar una analítica cercana al promedio de todos los análisis son, según la designación de la RCH-03, el 9, 13 y 14, muestras consideradas “representativas”.

Las cartografías realizadas para diferencias incrementales en isorrelaciones iónicas confirman que las operaciones de recarga están rejuveneciendo las aguas del acuífero de manera generalizada. Los incrementos para la relación Cl/HCO_3 son negativos para la práctica totalidad del acuífero. Los únicos sectores con valores positivos o nulos quedan ubicados en zonas de marcada intrusión salina continental, al este de Villagonzalo y en el extremo norte de la *Cubeta*, donde las aguas de recarga apenas habían interactuado con las del acuífero en el período operacional.

Al este de Santiuste se dan los valores negativos más bajos, por dilución de los procesos de contaminación puntual detectados previamente por efecto de las aguas residuales.

Los incrementos para la relación SO_4/Cl oscilan entre $-1,2$ y $+2,5$. Esta relación confirma que los procesos de rejuvenecimiento de las aguas son predominantes, permitiendo definir su distribución zonal. Los valores positivos se distribuyen al sur de Pinar Nuevo de Ciruelos, y los negativos al norte.

La zona con mayor influencia de los procesos de mezcla de aguas corresponde a la cabecera de la cacera de Betaya, y la que menos al noroeste de Villeguillo, donde las labores de AR apenas habían influido en la hidroquímica del sistema en la fecha de medición.

Los incrementos para la relación Mg/Ca oscilan entre $-1,2$ y $+4,3$. Las zonas de incremento negativo corresponden a zonas con procesos de rejuvenecimiento de las aguas. La línea de separación disecciona la *Cubeta* longitudinalmente, separando zonas de mayor y menor influencia de las operaciones de AR. Las zonas de valores negativos quedan a la derecha de esta bisectriz, interrumpida en las inmediaciones de Ciruelos, donde no ha llegado la influencia de las operaciones de AR. Las zonas con valores positivos quedan al noroeste de Villeguillo, en la mitad occidental de la *Cubeta* y en la zona de vertido de aguas residuales de Santiuste.

Cabe exceptuar la cabecera de la cacera de Betaya y la zona del Sanchón, donde se registra un fuerte enriquecimiento en magnesio en las aguas asociado a una zona de anomalías hidrogeológicas e hidroquímicas. Este proceso parece estar influido por la composición del suelo en este sector.

Los incrementos para la relación K/Na oscilan entre $-0,004$ y $0,40$. Los valores positivos se concentran exclusivamente en la falda del Cuerno de la Revilla y al este de este afloramiento de facies Cuestas. El resto del acuífero manifiesta procesos de rejuvenecimiento en las aguas subterráneas, especialmente en la zona de divisoria hidrogeológica al este de Villagonzalo de Coca.

De todas las relaciones ensayadas, la que manifiesta procesos de rejuvenecimiento de las aguas con mayor claridad y su distribución es la Mg/Ca. La utilidad de esta relación debe ser refrendada en otros acuíferos, ya que la abundancia de magnesio en la Cubeta de Santiuste y su aumento durante las labores de AR puede ser debido a un proceso local más que a una generalidad para el empleo de esta relación iónica en escenarios análogos.

La cartografía de isorrelaciones iónicas se perfila como una herramienta apropiada para estudiar la influencia de las operaciones de recarga en la hidroquímica del acuífero. Esta cartografía adquiere mayor expresividad al destacar la isolínea cero de alguna manera con respecto a las restantes. Además de presentar una sectorización clara y precisa permite detectar zonas puntuales con anomalías y singularidades específicas.

En la Fig. 3.51 se presenta un esquema de la distribución de esta relación a escala 1:50.000.

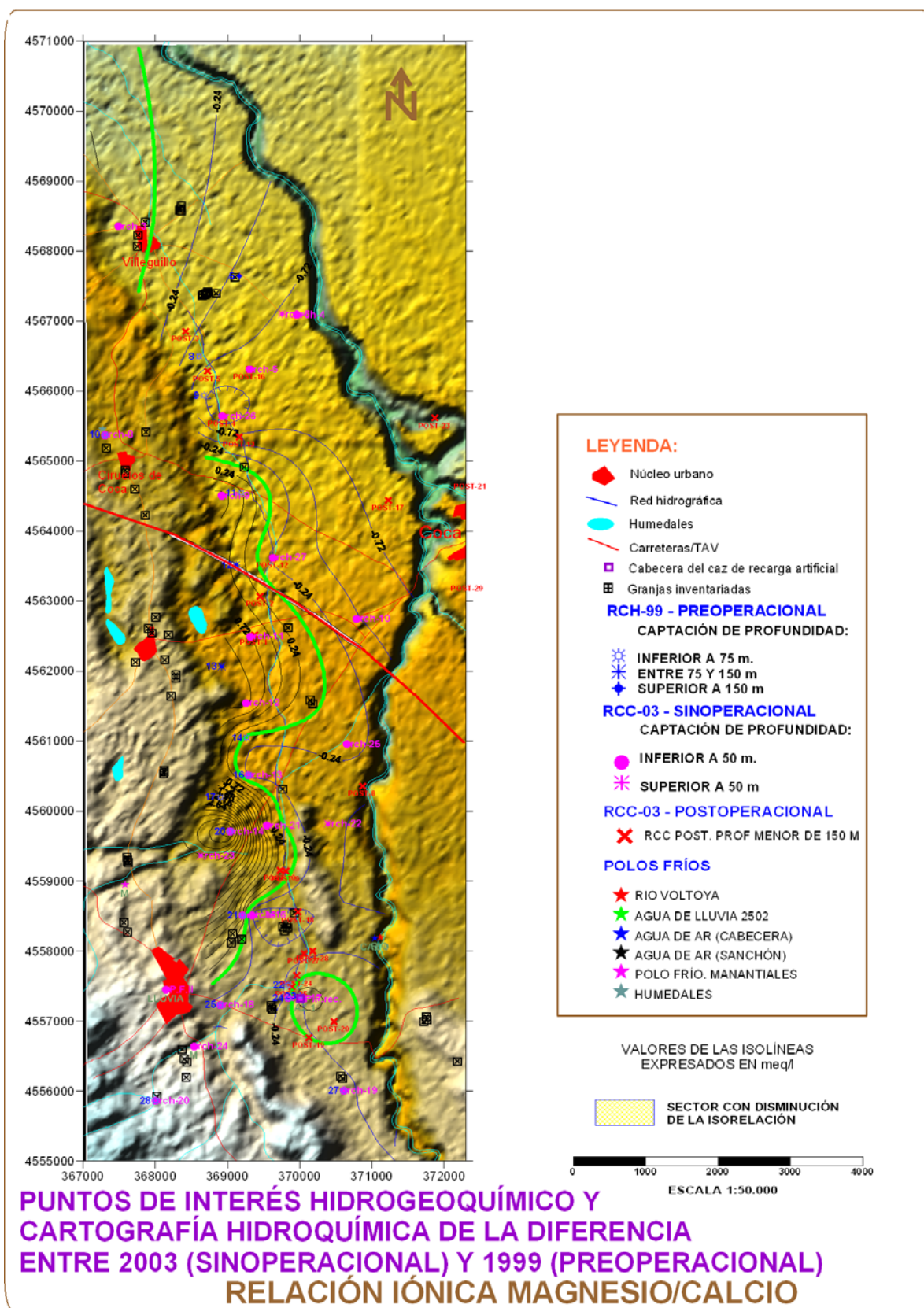
La presencia de anomalías importantes en cuanto a concentraciones de determinados iones debe ser estudiada con el análisis de los suelos y la composición mineralógica de los sedimentos en este sector.

Mg/Ca	K/Na	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	rNO ₃ /rCl	rCO ₃ H-/rNO ₃
JOVEN					
–	+	–	+	+	–
+	–	+	–	–	+
EVOLUCIONADA					

Fig. 3.51. Ordenamiento hipotético según el progreso del rejuvenecimiento de las aguas de acuerdo con la relación iónica elegida.

Fig. 3.52. Representación de la distribución de isolíneas de isorrelaciones iónicas magnesio-calcio en la Cubeta de Santiuste. La isolínea más gruesa corresponde al valor cero (verde). En azul se presentan las isolíneas de incrementos negativos y en negro de positivos. Esta relación se perfila de gran utilidad para detectar tendencias generales e incluso singularidades en la Cubeta de Santiuste, si bien habrá que comprobar su efectividad en escenarios análogos (Página siguiente).







6. FASE SÓLIDA: EL SUELO. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO

En cumplimiento de los objetivos especificados con anterioridad, el apartado ha sido dividido en los siguientes puntos, correspondientes a las técnicas aplicadas:

- Muestreo de la fase sólida.
- Testificación detallada.
- Análisis geoquímicos de los suelos (fracción sólida).
- Análisis granulométricos y clastométricos: análisis morfoscópico y granulométrico de las poblaciones de clastos.
- Conocimiento de la mineralogía aplicando técnicas petrográficas. Determinación de las fases minerales y cuantificación mediante el conteo modal.
- Capacidad de intercambio de bases y cationes de las arcillas (CEC).
- Estudio de la capacidad de autodepuración del terreno

6.1. MUESTREO DE LA FASE SÓLIDA

Se ha realizado en distintos episodios. El primero ha sido en el verano de 2002, previamente al inicio de las operaciones de recarga. Durante la etapa operacional han sido muestreados y analizados suelos en la zona del Sanchón (caz de recarga). En la misma zona se ha procedido al muestreo en la etapa postoperacional, con objeto de estudiar el grado de colmatación de los materiales.

6.1.1. Testificación detallada

La observación de muestras superficiales, testigos de sondeos o muestras inalteradas permite estudiar la homogeneidad del acuífero y la representatividad de la muestra para la zona en que ha sido extraída.

Las arenas eólicas tienen una composición mineralógica que en campo se puede distinguir mediante el uso de la lupa. Estas se caracterizan por presentar un contenido en cuarzo y feldespato muy similar, predominando en algunos lugares el cuarzo frente al feldespato (MAPA, 1999).

El porcentaje de calcita en la matriz es superior en las formaciones terciarias superficiales alteradas que en las arenas cuaternarias por lo general, de ahí la importancia de llevar a cabo cualquier testificación con cuentagotas de agua fuerte.

La clasificación de las muestras a tenor de los resultados obtenidos en laboratorio sería de arcosa o litoarcosa, dependiendo del contenido en fragmentos de rocas. Los feldespatos que predominan son los potásicos frente a los cálcicos y calcosódicos.

La materia orgánica se manifiesta en forma de bandas carbonosas o nódulos dentro de una matriz arenosa. Su importancia radica en la asociación con minerales sulfurosos y ferruginosos, así como con metales pesados tipo arsénico, especialmente en



moléculas orgánicas de gran volumen que albergan arsénico en forma de ácido MMA y DMA.

El aspecto de los testigos ofrece información relativa a las condiciones oxidantes o reductoras, ya que las formas reducidas de hierro, manganeso o alto contenido orgánico suele presentar una tonalidad gris o azulada. Mientras el hierro oxidado se relaciona con tonalidades rojizas, amarillentas y blancas en condiciones abióticas oxidantes. La tonalidad marrón resulta indicativa de situaciones bióticas oxidantes, si bien en ocasiones indica condiciones reductoras (Pyne, 1995).

Con objeto de deducir el origen genético de las arenas del sistema dunar y de caracterizar ambientes hidroquímicos dentro del acuífero, se ha realizado una testificación detallada de todos los testigos extraídos de las perforaciones realizadas en la *Cubeta* a lo largo de los años 2002 y 2003, durante las campañas de perforación promovidas por el MAPA tras el diseño de sus redes de control (MAPA, 2003).

La testificación detallada de las muestras se adjunta en el Anexo 3.2.1. *Testificación detallada de los testigos de las perforaciones*, con objeto de dejar constancia de la descripción mineralógica y textural detallada de los testigos de las perforaciones.

Los códigos empleados son los habituales en geotecnia para proporciones relativas en peso (indicios de, algo, bastante, sufijo oso/osa) para proporciones relativas de 10, 20, 35 y hasta 50 % respectivamente.

6.1.2. Técnicas analíticas

Se diferencian cuatro tipologías diferentes: la geoquímica y mineralógica, análisis granulométricos, clastométricos y texturales.

El principal objetivo de la analítica geoquímica ha sido contar con una caracterización detallada de los principales tipos de suelo, de cara a aplicar herramientas de cálculo de interacción con el agua subterránea basadas en códigos.

El estudio mineralógico se ha realizado con objeto de definir los ambientes de procedencia de las arenas que constituyen el acuífero principal. Este objetivo requiere el empleo de técnicas adicionales, entre las que cabe destacar los análisis de la granulometría de la población de muestras, los estudios morfoscópicos y los texturales de cada muestra en particular.

6.1.2.1. Análisis geoquímicos de la fracción sólida

El análisis de roca total se ha realizado en laboratorio homologado para seis muestras, todas ellas representativas de los principales transeptos del sistema:

- Arena dunar de la Fm Arévalo.
- Margas de las facies Cuestas (sustrato del acuífero).



- Minerales salinos y arcillosos del sustrato de las lagunas salinas Caballo Alba y de la Iglesia.

En todos los casos se trata de muestras superficiales de zona no saturada.

Los parámetros determinados en los litotipos han sido los siguientes: conductividad del suelo (extracto saturado), pH, concentración en bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitrógeno total, fósforo, materia orgánica oxidable, sodio, potasio, calcio, magnesio, granulometría y clasificación.

Los resultados del análisis se presentan en el Anexo 3.2.2. *Resultados Analíticos*, y en las Tablas adjuntas 3.87 y 3.88. La estructura de la tabla es:

- *NOMBRE*. Denominación asignada a la muestra
- *X, Y, Z*. Coordenadas UTM y cota sobre el nivel del mar.
- *Fecha*. Día de muestreo de la fracción sólida.
- *C* (mmhos/cm). Conductividad del sustrato.
- *pH*. Concentración de hidrógeno.
- *HCO₃* (mg/l). Concentración en ión bicarbonato.
- *Cl* (mg/l). Concentración en ión cloruro.
- *SO₄* (mg/l). Concentración en ión sulfato.
- *N t* %. Porcentaje de nitrógeno total.
- *P* (ppm). Concentración en ión fósforo.
- *MOO* %. Porcentaje de materia orgánica oxidable.
- *Na* (meq/100g). Concentración del catión sodio en relación molar.
- *K* (meq/100g). Concentración del catión potasio en relación molar.
- *Ca* (meq /100g). Concentración del catión calcio en relación molar.
- *Mg* (meq/100g). Concentración del catión magnesio en relación molar.
- *Arena* %. Fracción granulométrica tamaño arena.
- *Limo* %. Fracción granulométrica tamaño limo.
- *Arcilla* %. Fracción granulométrica tamaño arcilla.
- *H.E.* Humedad equivalente. Parámetro artificial que resulta de la relación: $He = 4'6 + 0'43\% \text{ arcilla} + 0'25\% \text{ limo} + 1'22\% \text{ M.O.}$ (Sánchez Palomares y Blanco, 1985).
- *CL*. Clasificación USDA.

N	NOMBRE	X	Y	Z	fecha	C (mmhos/cm)	pH	arena %	limo %	arcilla %	HE.	Clas
1	Facies Cuestas Coca	371615	4563282	769,7	6/28/02	0,60	7,8	11,85	33,8	54,35	36.5669	ac
2	Cruce caz-vía AVE	367939	4569405	768,0	6/28/02	0,70	8,1	92,78	3,72	3,5	7.2546	ar
3	Laguna de la Iglesia	368550	4562780	786,7	6/28/02	1,50	9	4,95	27,25	67,8	41.9329	ac
4	Laguna Caballo Alba	365500	4567250		6/28/02	2,10	9,5	14,55	17,15	68,3	38.9153	ac
5	Arena Dunar	370061	4562904	786,0	6/28/02	0,40	7,2	94,81	1,94	3,25	6.4947	ar
6	Arena Dunar Betaya	369695	4560322	792,0	6/28/02	0,50	8,6	90,53	2,87	6,6	8.2775	ar

Tabla 3.87. Localización de las muestras de suelos.

N	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	N t %	P (ppm)	MOO %	Na (meq/100g)	K (meq/100g)	Ca (meq /100g)	Mg (meq/100g)
1	194	62	45	0,021	8	0,12	0,384	1.841	29.411	12.467
2	181	98	39	0,022	24	0,18	0,03	0,205	2.757	0,673
3	259	204	168	0,105	20	1,12	7.984	3.325	11.407	15.929



4	285	373	188	0,053	21	0,54	21.956	3.325	2.952	10.345
5	155	53	41	0,070	4	0,01	0,02	0,102	4.708	0,276
6	194	44	162	0,015	4	0,10	0,175	0,307	4.496	1.704

Tabla 3.88. Análisis geoquímico de las muestras de suelos.

A la vista de los resultados, se aprecia que en todos los casos los resultados analíticos resultan representativos de las facies a las que corresponden.

Las facies Cuestas (muestras 1 y 2) presentan valores propios de materiales margosos, con una conductividad en torno a los 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH ligeramente básico (7,8) y mayor proporción de cationes alcalinos y alcalino térreos que las arenas dunares.

En cuanto al lecho de las lagunas y bodones de la Iglesia y Caballo Alba (muestras 3 y 4), se aprecia un carácter salino con una conductividad entre 1.500 y 2.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH muy básico (9 a 9,5) y abundancia de cloro y sodio, como resultado de su proceso genético (flujos regionales ascendentes con un tiempo de residencia en el acuífero alto).

En el caso de la arena dunar (muestras 5 y 6), con fracción silíceea muy alta, existe una baja concentración de iones salinos (conductividad entre 400 y 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH neutro para el sector central (7,2) y alcalino para el septentrional (8,6), según el baremo de Spouncer (*Spouncer et al, 2001*). El contenido en materia orgánica oxidable es relativamente bajo (menor de 0,18). Los resultados obtenidos son los “normales” para estas facies.

El análisis de macroconstituyentes es demasiado genérico para aplicar códigos de modelización tipo Netpath dado que no hay un análisis minucioso de las fases minerales estables, tan sólo de la relación química global de algunos constituyentes. Este hecho conlleva la necesidad de obtener resultados analíticos aplicando otras metodologías adicionales.

6.1.2.2. Análisis granulométricos

Los análisis **granulométricos** de las poblaciones presentan una doble finalidad: por un lado, se pretende deducir el ambiente genético de los materiales, y, por otro, la potencialidad de colmatación del acuífero como consecuencia del porcentaje de finos, partículas susceptibles de ser movilizadas durante la recarga artificial.

La presencia de finos en el acuífero regula las reacciones de interacción y presentan una gran potencialidad para la colmatación física, contribuyendo incluso a incrementar el efecto del *bioclogging*. La presencia de finos en las aguas de recarga constituye la principal amenaza para las instalaciones de recarga artificial. El Total de Sólidos Disueltos (TSD) tiene un efecto adverso en la conductividad hidráulica de un acuífero (*Álvarez y Sánchez, 1997*).

Este hecho no es equiparable con la turbidez, que no constituye de por sí un buen indicador para cuantificar el parámetro TSD (*Pyne, 1995*), tan sólo la carga en suspensión.

El TSD constituye un parámetro importante para su seguimiento, de ahí su idoneidad para ser empleado como indicador: Una concentración de 2 mg/l puede ser suficiente para reducir de forma significativa el caudal de recarga en los pozos (Pyne, 1995).

Los análisis granulométricos disponibles corresponden a las muestras presentadas en la Tabla 3.89. Los códigos son similares a las tablas anteriores, salvo:

- prof MA (m): Profundidad de muestreo de la muestra alterada.
- PROF MI (m): Profundidad de muestreo de la muestra inalterada.
- PROF. SOND: Profundidad de la perforación.
- prof muro: Profundidad del contacto entre facies terciarias y cuaternarias.
- prof n.e: Profundidad del nivel del agua.
- FECHA: Fecha de determinación de la cota del nivel freático.
- b (m): espesor saturado del acuífero cuaternario.

Sondeo	X	Y	Z	prof MA (m)	PROF MI (m)	PROF. SOND	prof muro	prof n.e.	FECHA	b (m)
INV-20	367419	4570177	763.0	9.9		29.39	30	5.65	13/01/03	24.35
INV-34	367529	4569305	766.2	12.45		40	41	6.32	01/06/03	33.68
INV-57	368686	4567906	771.1	2.5		21	22	7.94	30/07/03	13.06
INV-57	368686	4567906	771.1		3-3.6	21	22	7.94	30/07/03	13.06
INV-84	369306	4566315	778.7	13.8		20.57	16.8	11.11	13/01/03	5.69
INV-100	368782	4565871	778.1	3.05		25	15.5	8.78	18/07/03	16.22
INV-104	369787	4565325	780.9	13.7		20.6	15.65	11.67	13/01/03	3.98
INV-118	370037	4564627	779.4	8.1		20	21	13.08	13/01/03	7.92
INV-118	370037	4564627	779.4	14.45		20	21	13.08	13/01/03	7.92
INV-121	371224	4564445	782.2	4.9		12	5	4.6	01/06/03	7.4
INV-121	371224	4564445	782.2		6-6.6	12	5	4.6	01/06/03	7.4
INV-122	368958	4564189	782.0	6.5		15	11.9	10.2	01/06/03	4.8
INV-122	368958	4564189	782.0		5.4-6.0	15	11.9	10.2	01/06/03	4.8
INV-158	369337	4562450	786.6	3.5		21	15.25	8.63	01/06/03	12.37
INV-158	369337	4562450	786.6		9.6-10.2	21	15.25	8.63	01/06/03	12.37
INV-166	370689	4561876	789.1	7.45		18	10.4	13.43	01/06/03	4.57
INV-166	370689	4561876	789.1		7.8-8.4	18	10.4	13.43	01/06/03	4.57
INV-166	370689	4561876	789.1		17.4-18.0	18	10.4	13.43	01/06/03	4.57
INV-181	370648	4560956	791.9	7.2		20.9	11.1	17.41	13/01/03	3.49
INV-204	369662	4560253	790.8	2.4		11.54	9	0.72	13/01/03	8.28
INV-245	369475	4559082	798.3	12.1		20.7	19.2	8.47	13/01/03	10.73
INV-261	369979	4558559	798.3		8.4-9.0	21	18.3	14.66	01/06/03	6.34
INV-303	370474	4556999	803.8	14.5		28.3	30	19.8	13/01/03	10.2

Tabla 3.89. Muestras sometidas a análisis granulométricos, posición y propiedades relativas al punto de muestreo.

Los resultados del análisis granulométrico para las 19 muestras se presentan en la Tabla 3.90. La estructura de la tabla es:

- n.º Código de identificación de la muestra.
- Sond. Sondeo en que fue extraída según la terminología del MAPA, 2003.
- Prof (m). Profundidad de muestreo.
- X, Y, Z: Coordenadas UTM.



- % Grava. Fracción granulométrica tamaño grava.
- % Arena. Fracción granulométrica tamaño arena.
- % Finos. Fracción granulométrica tamaño arcilla y limo.
- Tamaño del tamiz (área de paso) en mm. Los tamices empleados han sido de los pasos consecutivos siguientes: 76,2; 50,8; 38,1; 25,4; 19,1; 9,52; 4,75; 2; 1,19; 0,42; 0,149 y 0,074 mm. En la fila superior se presenta la designación del tamiz según norma ASTM.

Tamiz a.s.t.m.									3	2	1,5	1	3/4	3/8	N.º 4	N.º 10	N.º 16	N.º 40	N.º 100	200
n.º	Sond	Pr (m)	X	Y	Z	% GRAVA	% ARENA	% FINOS	76,2	50,8	38,1	25,4	19,1	9,52	4,75	2	1,19	0,42	0,149	0,074
1	20	9,9	367419	4570177	763	23,2	67,8	9	100	100	100	100	100	97,2	93,5	76,8	57,3	23,2	11,8	9
2	57	2,5	368686	4567906	771,1	0,6	46,4	53	100	100	100	100	100	100	100	99,4		80,8	60,7	53
3	84	13,8	369306	4566315	778,7	14,5	75,5	10	100	100	100	100	100	99	96,4	85,5	70,1	27,2	13	10
4	104	13,7	369787	4565325	780,9	14,2	75,7	10,1	100	100	100	100	100	98,9	96	85,8	69,5	26,7	13,2	10,1
5	122	6,5	368958	4564189	782	1,1	87,5	11,4	100	100	100	100	100	100	99,6	98,9		64,4	22,3	11,4
6	118	8,1	370037	4564627	779,4	15,4	66,5	18,1	100	100	100	100	100	98,7	96,4	84,6	68,7	38	23	18,1
7	118	14,45	370037	4564627	779,4	8,1	83,1	8,8	100	100	100	100	100	100	98,1	91,9	74,5	39,3	12,7	8,8
8	158	3,5	369337	4562450	786,6	2,2	95,3	2,5	100	100	100	100	100	100	99,8	97,8		18,7	3,1	2,5
9	245	12,1	369475	4559082	798,3	2,8	88,9	8,3	100	100	100	100	100	100	99,2	97,2	86,8	60,4	11,3	8,3
10	204	2,4	369662	4560253	790,8	16,8	69,1	14,1	100	100	100	100	96,9	96,9	94,8	83,2	65,6	26,8	16,7	14,1
11	303	14,5	370474	4556999	803,8	22,8	64,3	12,9	100	100	100	100	94,1	86	82,8	77,2	61,3	29,4	16,5	12,9
12	181	7,2	370648	4560956	791,9	1,7	78,8	19,5	100	100	100	100	100	100	100	98,4		59,2	42,4	23,6
13	34	12,45	367529	4569305	766,2	3,4	63,9	32,7	100	100	100	100	100	100	99,9	96,6		57,6	37,8	32,7
14	261	8,7	369979	4558559	798,3	19	76,7	4,3	100	100	100	100	100	100	98,4	81		17,7	6,1	4,3
15	121	4,9	371224	4564445	782,2	0	0,7	99,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,8	99,6	99,3
16	166	7,45	370689	4561876	789,1	0	27,8	72,2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94,3	80,8	72,2
17	166	8,1	370689	4561876	789,1	8,3	86,4	5,3	100	100	100	100	100	100	99,3	91,7		31,5	8,6	5,3
18	166	17,7	370689	4561876	789,1	0	1,1	98,8	100	100	100	100	100	100	100	100		99,5	99,4	98,9
19	100	3,05	368629	4565382	777,1	20,9	63,9	15,2	100	100	100	100	100	96,1	92,1	79,1		31,4	18,4	15,2

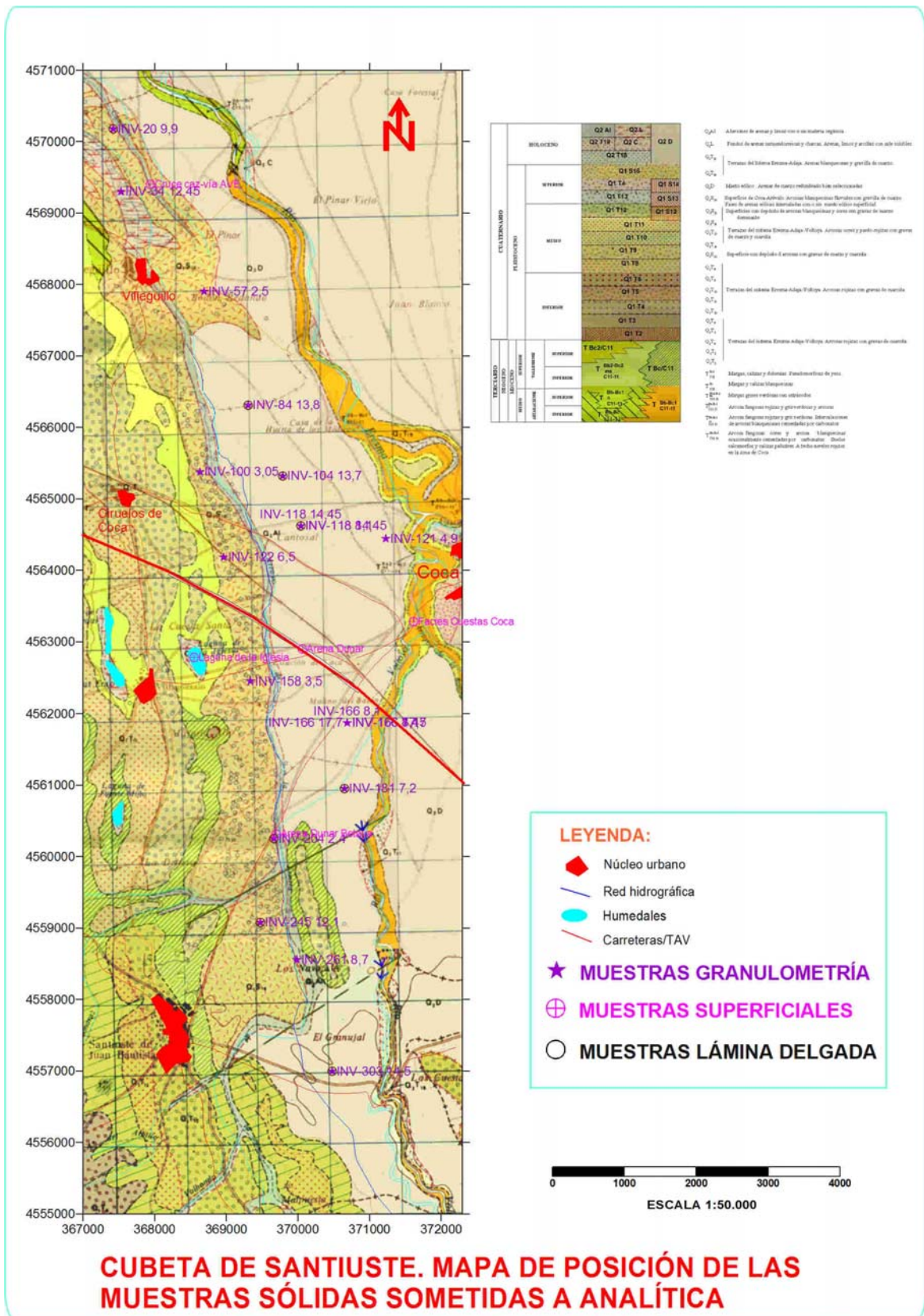
Tabla 3.90. Resultados de las granulometrías en las muestras analizadas.

La distribución espacial de estas muestras se presentan en la Fig. 3.53. Su designación corresponde al punto de agua (perforación) donde ha sido extraída, seguido de su profundidad.

Con los datos obtenidos se han elaborado las correspondientes curvas granulométricas (Anexos 3.2.3. y 3.2.3.1).

La morfología de las curvas aporta información importante relativa a la procedencia de los sedimentos, tarea postergada para el final de este apartado, ya que es preciso realizar previamente estudios texturales y estadísticos de los clastos, con objeto de alcanzar una adecuada caracterización.

Fig. 3.53. Distribución de las 19 muestras sólidas tomadas en el acuífero. En morado: muestras sometidas a ensayos granulométricos. En rosado: Muestras de arena superficiales con estudio geoquímico. En negro: muestras estudiadas por técnicas petrográficas sobre lámina delgada. Todas ellas han sido visualizadas en lupa binocular para el estudio de su textura. Escala 1:50.000 (página siguiente).





6.1.2.3. *Análisis morfométricos y clastométricos*

Los análisis basados en técnicas sedimentológicas permiten obtener información relevante de la configuración del acuífero y del funcionamiento hidrogeológico del sistema. Para ello se ha estudiado la morfoscopia y textura de los sedimentos con lupa binocular.

El estudio de la **morfoscopia** de los sedimentos se ha realizado mediante lupa binocular. Las muestras seleccionadas han sido en total 18, las mismas empleadas para los análisis granulométricos. En los casos en que ha sido posible, las muestras han sido además caracterizadas hidroquímicamente, llevando a cabo la medición de los principales parámetros inestables del agua en el punto de muestreo.

Las muestras estudiadas con lupa binocular se presentan en las Tablas 3.91 y 3.92. En ellas se hace constar su profundidad, ubicación, nivel del agua (con objeto de determinar si la muestra se encuentra en zona saturada o no saturada), conductividad y pH del agua en caso de ser muestras tomadas en zona saturada. Así mismo se presenta las fotografías tomadas en cada una y la magnificación.

Los resultados se presentan en la Tabla 3.91, cuya estructura es:

- Código. Sondeo y profundidad de muestreo, de acuerdo con la terminología empleada en MAPA, 2003
- X, Y, Z. Coordenadas UTM y altitud del punto de muestreo.
- PROF. Tot. Profundidad total del sondeo perforado.
- N.E.MEDIDO. Profundidad del agua con respecto al emboquille.
- FECHA de las determinaciones.
- pH ag. pH del agua.
- C ag ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Conductividad del agua.
- TDS. Total de sólidos disueltos (%).
- MICRO 16X. Disponibilidad de fotografías en lupa binocular con magnificación 16x, y código empleado para su catalogación.
- MICRO 25X. Disponibilidad de fotografías en lupa binocular con magnificación 25x.
- MICRO 40X. Disponibilidad de fotografías en lupa binocular con magnificación 40x.

Las fotografías de las muestras se presentan en los Anexos 3.2.4. *Estudio textural, Observación con lupa binocular*, y 3.2.4.1. *Documentación gráfica*, junto con la descripción e interpretación de las 18 muestras estudiadas con lupa binocular, cuyas curvas granulométricas y documentación gráfica generada se adjuntan en el mismo.

A partir de la observación minuciosa de las muestras se ha llevado a cabo una caracterización textural, con objeto de complementar la información ya disponible para deducir la génesis, evolución y modalidad de transporte de los sedimentos.

código	X	Y	Z	PROF. Tot	N.E.MEDIDO	FECHA	pH ag	C ag (µS/cm)	TDS	MICRO 16X	MICRO 25X	MICRO 40X
20 80 CM	367419	4570177	763,0	29,39	5,71	13/01/2003	8,6	755	0,36	1 22		1 23
20 10,0 M	367419	4570177	763,0	29,39	5,71	13/01/2003	8,6	755	0,36	1 24		
20 14,0 M	367419	4570177	763,0	29,39	5,71	13/01/2003	8,6	755	0,36	1 25		1 26
84 2,0 M	369306	4566315	778,7	20,57	11,25	13/01/2003	7,5	1090	0,54	2 1		2 2
84 13,8 M	369306	4566315	778,7	20,57	11,25	13/01/2003	7,5	1090	0,54	2 4		
84 14,1 M	369306	4566315	778,7	20,57	11,25	13/01/2003	7,5	1090	0,54	2 3		
104 1,8 M	369787	4565325	780,9	20,6	11,75	13/01/2003	7,8	610	0,3	2 5		
104 13,7 M	369787	4565325	780,9	20,6	11,75	13/01/2003	7,8	610	0,3	2 6		2 24
118 1,7 M	370037	4564627	779,4	20	13,25	13/01/2003	7,5	310	0,15	2 7		2 8
118 8,2 M	370037	4564627	779,4	20	13,25	13/01/2003	7,5	310	0,15	2 10		2 11
245 1,3 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,55	13/01/2003	8	1020	0,5	2 12		2 13
245 12,1 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,55	13/01/2003	8	1020	0,5	2 15	2 16	
245 15,5 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,55	13/01/2003	8	1020	0,5	2 14		
204 1,2 M	369662	4560253	790,8	11,54	0,76	13/01/2003	8,9	230	0,11	2 17		2 18
204 2,4 M	369662	4560253	790,8	11,54	0,76	13/01/2003	8,9	230	0,11	2 19		
303 1,0 M	370474	4556999	803,8	28,3	19,87	13/01/2003				1 1	1 3	1 2
303 14,4 M	370474	4556999	803,8	28,3	19,87	13/01/2003				1 4		1 5
181 2,4 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,46	13/01/2003	8,6	600	0,29	2 20	1 20	
181 7,2 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,46	13/01/2003	8,6	600	0,29	2 22		2 23
181 8,5 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,46	13/01/2003	8,6	600	0,29	2 21		
181 12,5 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,46	13/01/2003		600	0,29		1 21	
20318284	371615	4563282		0	N/A	28/06/2002	7,8	0,60		1 6		1 7
20318285	367939	4569405		0	N/A	28/06/2002	8,1	0,70		1 8	1 9	
ZONA AVE	367939	4569405		0	N/A	13/01/2003				1 18		1 19
20318286	368550	4562780		0	N/A	28/06/2002	9	1,50		1 10	2 25	1 11
20318287	365500	4567250		0	N/A	28/06/2002	9,5	2,10		1 12		1 13
20318288	370061	4562904		0	N/A	28/06/2002	7,2	0,40		1 14	1 15	
20318289	369695	4560322		0	N/A	28/06/2002	8,6	0,50		1 16		1 17

Tabla 3.91. Muestras en las que se ha realizado un análisis granulométrico y parámetros inestables de la fracción líquida en el punto de muestreo. Además estas muestras han sido sometidas a análisis morfooscópico y granulométrico. Las muestras con las que se ha elaborado lámina delgado-pulida se presentan coloreadas.

6.1.2.4. Caracterización textural y estructural de los sedimentos

6.1.2.4.1. Caracterización textural

En el proyecto actual cobra especial importancia la caracterización textural y especialmente granulométrica de los materiales, para la determinación de su origen, conocimiento de su evolución, y, por ende, de su influencia en el funcionamiento hidrogeológico del sistema y en el quimismo de las aguas que interaccionan con el medio, cuyo estudio se lleva a cabo en el apartado siguiente.

Cabe diferenciar dos grupos de muestras que van a tener un tratamiento diferente en función de su disponibilidad de datos.

Por un lado hay muestras representativas de las distintas *unidades hidroambientales* de la zona de estudio: arenas del sistema dunar, del acuitardo

infrayacente y del sustrato de las zonas húmedas. Estas muestras han sido tomadas con criterios de representatividad, y hay disponibilidad de datos tanto de su granulometría como de su quimismo, Anexos 3.2.2 y 3.2.3.

Un segundo grupo corresponde a los sondeos mecánicos perforados en el acuífero principal, correspondiente al sistema dunar. En ellas se ha realizado un análisis granulométrico sin determinaciones geoquímicas. En la Tabla 3.92 se presenta un resumen de las características clastométricas de las muestras:

SONDEO	X	Y	Z	% AR medio >	% AR fin	% FINOS
20	367419	4570177	763	23,2	67,8	9
57	368686	4567906	771,1	0,6	46,4	53
84	369306	4566315	778,7	14,5	75,5	10
104	369787	4565325	780,9	14,2	75,7	10,1
122	368958	4564189	782	1,1	87,5	11,4
118 (8,1 m)	370037	4564627	779,4	15,4	66,5	18,1
118 (14,5 m)	370037	4564627	779,4	8,1	83,1	8,8
158	369337	4562450	786,6	2,2	95,3	2,5
245	369475	4559082	798,3	2,8	88,9	8,3
204	369662	4560253	790,8	16,8	69,1	14,1
303	370474	4556999	803,8	22,8	64,3	12,9
181	370648	4560956	791,9	1,7	78,8	19,5
34	367529	4569305	766,2	3,4	63,9	32,7
261	369979	4558559	798,3	19	76,7	4,3
121	371224	4564445	782,2	0	0,7	99,3
166 (7,4-7,5 m)	370689	4561876	789,1	0	27,8	72,2
166 (7,8-8,4 m)	370689	4561876	789,1	8,3	86,4	5,3
166 (17,4-18 m)	370689	4561876	789,1	0	1,1	98,8
100	368629	4565382	777,1	20,9	63,9	15,2

Tabla 3.92. Resumen de la posición y características clastométricas de las muestras tomadas en sondeos.

En esta sección se lleva a cabo un análisis mayormente textural, cuya información debe ser complementada con la extraída en los restantes apartados.

• Definición textural de la población

Un sedimento queda perfectamente definido, texturalmente hablando, cuando es clasificado petrográficamente, analizado estadísticamente y cuando son definidos una serie de parámetros clastométricos y morfológicos (Mingarro y Ordóñez, 1982).

En seis de las 25 muestras analizadas (correspondientes a las principales unidades hidroambientales) se ha llevado a cabo la determinación textural precisa, al existir una disposición de datos analíticos superior a las del sistema dunar. En estas muestras, dada la alta diversidad de ambientes que representan, se ha considerado improcedente realizar un tratamiento estadístico modal encaminado a deducir ambientes genéticos.

En las 18 muestras restantes (correspondientes al sistema dunar) se ha realizado un tratamiento textural en función de los datos disponibles, orientado al estudio genético y evolutivo del sistema dunar de la *Fm Arévalo* en la Cubeta de Santiuste.

- **Clasificación petrográfica**

Las muestras son samita en todos los casos, de acuerdo con la clasificación propuesta por *Mingarro (1969)*.

- **Análisis estadístico**

El análisis se lleva a cabo aplicando ciertos parámetros clastométricos y análisis gráficos.

Los parámetros clastométricos han sido calculados considerando el valor medio de cada intervalo. A continuación se definen y listan los resultados de los parámetros principales:

- **Media:** Media aritmética de los tamaños.

$$Tm = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n f_i} = \bar{x}$$

Los resultados obtenidos aparecen tabulados en el cuadro adjunto al final del apartado.

- **Mediana.** Tendencia central de la distribución: Q_{50} .

Los resultados obtenidos aparecen tabulados en el cuadro adjunto.

- **Moda.** Tamaño de la clase modal del histograma.

Los resultados obtenidos aparecen tabulados en el cuadro adjunto.

- **Desviación media.** Valor medio absoluto de los desvíos de cada clase.

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^n f_i |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^n f_i} = \overline{|x_i - \bar{x}|}$$

Los resultados obtenidos aparecen tabulados en el cuadro adjunto.

- **Desviación típica o desviación estándar.** Raíz del cuadrado medio de las desviaciones.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n f_i}}$$

Los resultados obtenidos aparecen tabulados en el cuadro adjunto.

- **Simetría o sesgo.** Grado de asimetría de una distribución. El sesgo de *Pearson* es:

$$Sesgo = \frac{Media - Moda}{Desv. estándar}$$

Los resultados obtenidos aparecen tabulados en el cuadro adjunto (Tabla 3.93).

MUESTRA	MEDIA	Mediana	Moda	Desv. Media	Desv. típica	Sorting
20	0,62	0,82	0,27	1,33573	3,02	-0,09
57	0,06	0,82	0,27	1,47079	3,92	-0,07
84	0,41	0,82	0,27	1,38055	3,34	-0,08
104	0,40	0,82	0,27	1,382125	3,35	-0,08
122	0,09	0,82	0,27	1,44952	3,84	-0,07
118 (8,1 m)	0,43	0,82	0,27	1,379605	3,32	-0,08
118 (14,5 m)	0,26	0,82	0,27	1,41265	3,58	-0,08
158	0,12	0,82	0,27	1,439905	3,78	-0,07
245	0,13	0,82	0,27	1,439455	3,77	-0,07
204	0,46	0,82	0,27	1,370665	3,27	-0,08
303	0,61	0,82	0,27	1,339525	3,04	-0,09
181	0,10	0,82	0,27	1,450105	3,83	-0,07
34	0,13	0,82	0,27	1,447375	3,79	-0,07
261	0,52	0,82	0,27	1,355035	3,17	-0,09
121	0,03	0,82	0,27	1,494685	4,02	-0,07
166 (7,4-7,5 m)	0,04	0,82	0,27	1,48249	3,98	-0,07
166 (7,8-8,4 m)	0,26	0,82	0,27	1,410055	3,56	-0,08
166 (17,4-18 m)	0,03	0,82	0,27	1,49301	4,01	-0,07
100	0,56	5,07	0,27	1,35025	3,12	-0,09

Tabla 3.93. Resultado del análisis llevado a cabo calculando los principales parámetros clastométricos y análisis gráficos.

La representación gráfica de la estadística clastométrica aparece en el apartado siguiente para las 19 muestras analizadas.

– Distribución de frecuencias de *Twenhofel*

La distribución de frecuencias de *Twenhofel* (en Mingarro y Ordóñez, 1982), es concordante para las 19 muestras:



- Gravas: 9,21 %: *Tamaño raro (R)*. Clase modal (ss).
- Arenas: 64,18 %: *Tamaño Dominante (D)*. Clase modal (ss).
- Finos: 26,61 %: *Tamaño raro (R)*. Clase modal secundaria y distal fina.

A tenor de estos resultados, el tramo objeto del estudio presenta una distribución de frecuencias granulométricas trimodal, con un predominio de arenas eólicas sobre las arcillas y limos fluviales y lagunares, y de estos sobre las gravas fluviales.

En cuanto a la distribución de frecuencias, se ha realizado un histograma de la población de muestras analizadas, considerando los principales intervalos clastométricos de la serie ASTM. Con estos datos se han realizado las gráficas para la distribución de frecuencias normal y acumulada (Figs. 3.54 a 3.56).

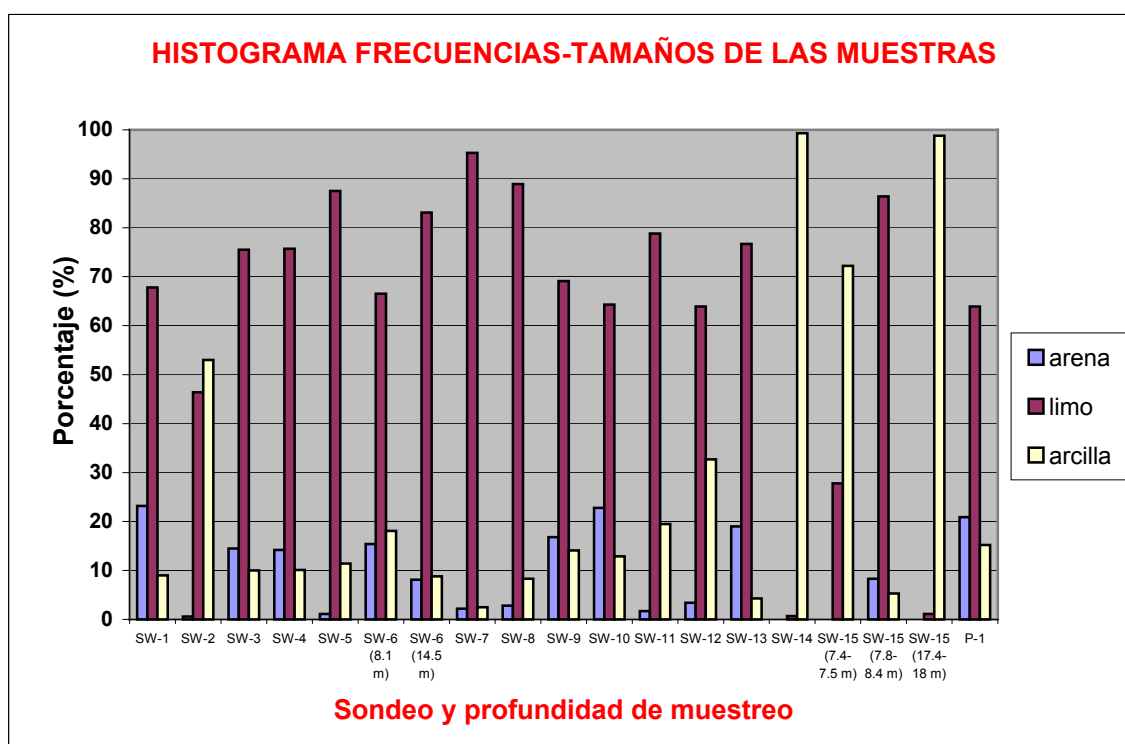
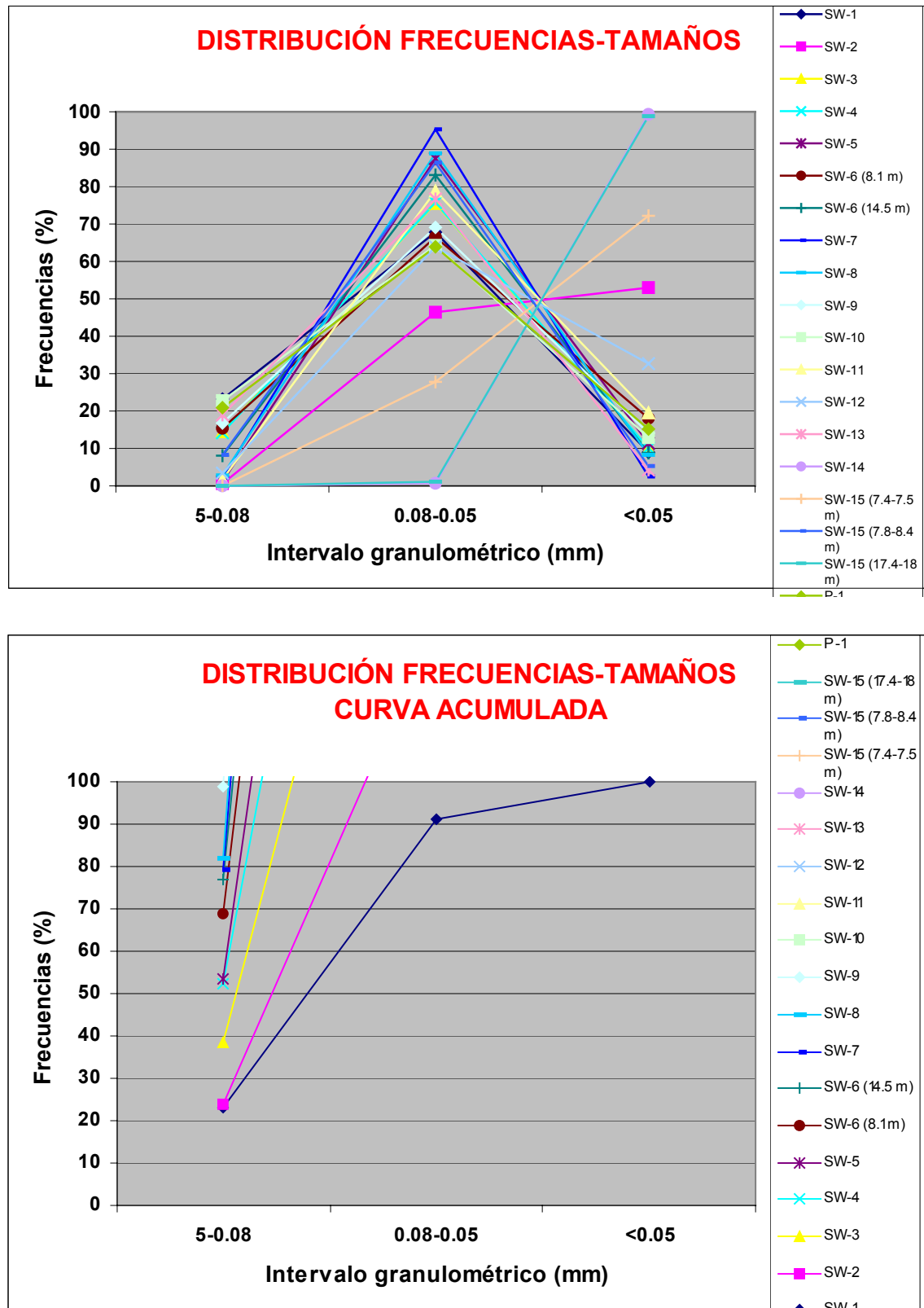


Fig. 3.54. Histograma de frecuencias para la población de muestras analizadas, considerando los principales intervalos clastométricos de la serie ASTM.



Figs. 3.55. y 3.56. Distribución de frecuencias normal y acumulada para la población de muestras analizadas, considerando los principales intervalos clastométricos de la serie ASTM.

– Análisis de subpoblaciones

A partir de la observación de la curva de frecuencias acumulada, se puede diferenciar dos subpoblaciones integrantes bien diferenciadas. Estas subpoblaciones son establecidas por los segmentos que presentan una cierta rectitud, con unos puntos en los que cambia bruscamente la tendencia, llamados truncaciones.

Dichas subpoblaciones han sido designadas media y fina. El punto de intersección define la truncación gruesa o el solape.

El agente eólico al movilizar los clastos lo hará fundamentalmente por tracción para la fracción gruesa, por saltación para la media y por suspensión para la fina.

La subpoblación gruesa es para los clastos mayores de 0,51 mm. El punto de intersección define la truncación gruesa o el solape.

La subpoblación media es para los clastos menores de 0,51 mm y mayores de 0,16 mm, que supone más del 90 % de las muestras. El punto de intersección define la truncación fina.

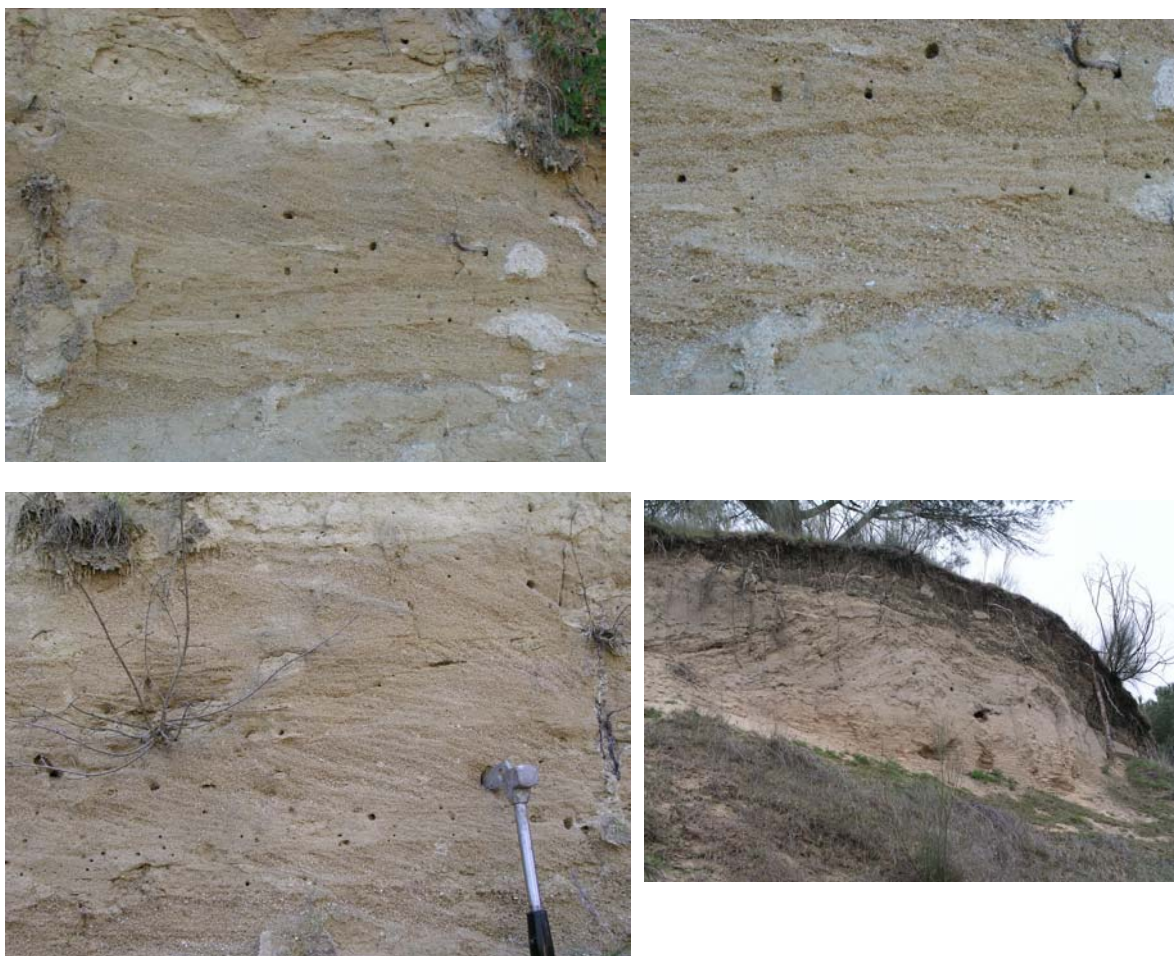
La subpoblación fina es para los clastos menores de 0,16 mm, que supone cerca del 5,1% de las muestras.

– Definición de parámetros morfológicos

La forma de los clastos es por lo general cilíndrica o laminar según los índices de *Zingg* y redondeada o subredondeada según las categorías de *Pettijohn*.

- Estudio de las estructuras

No se ha realizado un análisis estructural de los sedimentos específico. Tan sólo se han detectado afloramientos con estratificación cruzada de bajo ángulo típica de un sistema dunar en las terrazas del río Eresma. en las inmediaciones de Coca y Villeguillo (Figs. 3.57 a 3.60). La disposición de los sets desvelan una dirección de progradación principal de suroeste a noreste.



Figs. 3.57 a 3.60. Estratificación cruzada de bajo ángulo típica de un sistema dunar en las terrazas de los ríos Voltoya, en los areneros de Coca, y del río Eresma, en las inmediaciones de Villeguillo.

6.1.2.5. Interpretación de los resultados

Del análisis de los resultados se ha llegado a una serie de conclusiones que aparecen resumidas a continuación.

La variabilidad textural de la totalidad de las muestras analizadas es amplia, con grandes variaciones entre las muestras 2, 14, 15₁ y 15₃ (sustrato terciario de la Fm Cuestas) y las restantes que corresponden al sistema dunar con escasas arcillas de origen fluvial por desbordamientos históricos, gravillas y gravas del mismo origen por episodios más energéticos.

La clasificación textural es *franco arenosa* o *arenosa*.

De acuerdo con la granulometría modal, se aprecia:

El mayor porcentaje de partículas gruesas de la *Cubeta* se presenta en la margen occidental, asociada a depósitos de piedemonte de las colinas que delimitan al acuífero por el este, y en el sector central relacionado con episodios esporádicos energéticos del arroyo de la Ermita.

La zona central y oriental de la *Cubeta* tiene mayor porcentaje de finos que la occidental, como consecuencia de la pendiente y de la cercanía de los cauces fluviales de los ríos Eresma y Voltoya, menos encajados durante el período de formación del acuífero y con desbordamientos ocasionales. Los finos que aparecen en la margen oeste corresponden a depósitos lagunares, en general de salinidad considerable.

Según los resultados de la analítica, la distribución de frecuencias granulométricas del área es bimodal en la mayoría de las muestras.

La variación de los parámetros según su profundidad muestra escasas variaciones, al quedar compensadas las diferencias laterales con las verticales por progradación de los distintos transeptos del sistema dunar durante su evolución.

En cuanto a su **morfoscopia**, cabe destacar que la mediana de las sedimentos analizados corresponde a arena fina, predominando los granos superiores a 0,3 mm Ø.

El índice de asimetría es elevado y de signo positivo (de 1,2 a 1,4 aproximadamente para los minerales transparentes). El de madurez es variable y oscila entre -8 y -10 de sur a norte.

En general, predominan los sedimentos de superficie deslustrada y mate subredondeados, y un alto porcentaje de granos rotos, especialmente en las inmediaciones de los cauces fluviales.

En el Anexo 3.2.4 se presenta una selección de las fotografías tomadas con lupa binocular. Estas reflejan diversos aspectos, tanto compositivos como evolutivos, de la fracción de suelo que interacciona con las aguas subterráneas.

En el mismo anexo figuran las curvas granulométricas obtenidas y la distribución de frecuencias resultante.

Además del estudio morfoscópico, se ha realizado un estudio morfométrico (tamaño del grano) con análisis de poblaciones de 18 muestras, estudiando las curvas granulométricas correspondientes. La Tabla 3.89 recopila datos relativos a la morfometría de las muestras, de acuerdo con la siguiente estructura: Posición, profundidad de muestreo para muestras alteradas (MA) o inalteradas (MI) y datos del sondeo de extracción (profundidad total, cota del muro, posición del nivel freático, fecha de muestreo y espesor saturado del acuífero cuaternario).

En general, se aprecia un sistema dunar en el que alternan episodios eólicos y fluviales de distinta energía, tanto en la horizontal como en la vertical, predominando las fracciones más gruesas hacia la zona meridional y en el entorno de los cauces fluviales principales, y fases salinas en el sector occidental, coincidiendo con el eje que alinea los principales humedales de la zona. El resultado es la combinación de sedimentos de distinto grado de evolución.

Las curvas granulométricas acumuladas presentan numerosas oscilaciones y frecuentes mesetas, especialmente en la zona de tránsito de curvas parabólicas a hiperbólicas.

Este hecho se ajusta a un proceso a acumulación que oscila entre semiforzado y forzado con transporte incompleto de los materiales.

Como aportaciones del apartado destacamos las siguientes:

En la *Cubeta* predomina la fase arenosa fina, con un tamaño promedio para los análisis realizados de 0,27 mm. Los granos de cuarzo presentan un grado de desgaste relativamente alto, siendo menor en los feldespatos.

En cuanto al área fuente de los sedimentos del sistema dunar, las técnicas empleadas confirman la aportación procedente desde el sur (Sistema Central), sin ser éste el único área fuente de los sedimentos. Los hechos que soportan esta hipótesis son:

- Los minerales transparentes presentan un grado de madurez creciente de sur a norte, de acuerdo con su morfoscopía, superficie deslustrada, mate y desgaste. El índice de madurez es relativamente bajo, rondando los 1,7 de media.
- El índice de asimetría oscila entre intervalos relativamente anchos y es menor hacia el sur, lo que indica sedimentos más evolucionados hacia el norte.
- Los histogramas de frecuencia acumulada también soportan esta hipótesis, abundando los histogramas parabólicos en las muestras tomadas en la zona meridional, indicadores de menor grado de evolución, tendiendo a planos o hiperbólicos en el extremo norte, indicadores de que el transporte ha sido más completo.

El área fuente y la distribución de los sedimentos confirman un ambiente eólico sometido a abundantes acciones hidrodinámicas y una redistribución de los sedimentos por procesos fluviales, típico de condiciones de periglaciario.

Los episodios más energéticos se ubican en las inmediaciones de los cursos fluviales actuales, que han constituido cuatro niveles de terrazas diferentes (*Alcalá del Olmo, 1975*).

Las oscilaciones del nivel freático aparentemente han liberado sesquióxidos que configuran los escasos horizontes edáficos que es posible diferenciar. Estas acciones hidromórficas cabe esperar que resulten incrementadas con la recarga artificial.

6.1.3. Estudio de la petrografía en lámina delgada

Dentro de los estudios relacionados con los procesos de interacción agua-suelos, se han aplicado técnicas petrográficas con objeto de determinar las fases minerales presentes. Esta metodología permite determinar qué minerales integran la formación acuífera y su distribución espacial, puntal de apoyo para poder deducir su geoquimismo y su influencia en las aguas subterráneas, profundizando además en el conocimiento de la génesis del acuífero.

Para ello se han realizado láminas delgadas a partir de seis muestras de arena de tres sondeos perforados en los sectores septentrional, central y meridional del acuífero.



De éstas tres fueron adquiridas en zona no saturada y dos en saturada, con objeto de poder estudiar la influencia de las aguas subterráneas en las arenas dunares.

La posición de los sondeos muestreados y la profundidad de las muestras son (Tabla 3.94):

Muestra	X	Y	Z	PROF, Tot	NE_NMT	NE_MSNM	FECHA	pH agua	C (µS/cm)	TDS
INV-104 1,8 M	369787	4565325	780,9	20,6	11,67	769	13/01/03			
INV-104 13,7 M	369787	4565325	780,9	20,6	11,67	769	13/01/03	7,8	610	0,3
INV-204 1,2 M	369662	4560253	790,8	11,54	0,72	790	13/01/03	8,9		
INV-245 1,3 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,47	790	13/01/03	8		
INV-245 15,5 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,47	790	13/01/03	8	1020	0,5

Tabla 3.94. Posición de los sondeos muestreados y profundidad de las muestras con lámina delgada. Las determinaciones químicas corresponden a parámetros inestables del agua en la posición del muestreo (zona saturada).

Las metodologías llevadas a cabo con estas muestras han sido:

- Testificación in visu (macro).
- Estudio de la morfoscopía con lupa binocular (meso).
- Estudio de los índices de madurez de los distintos minerales opacos y transparentes, y análisis petrográfico y mineralógico (micro).

En los Anexos 3.2.5. *Estudio textural y composicional. Observación con microscopio de luz polarizada*, y 3.2.5.1. *Documentación gráfica*, se presenta una selección de las muestras junto con fotografías microscópicas en las que son discretizadas varias fases minerales, algunas de composición química conocida y variable entre límites muy estrechos, como son los feldespatos o el cuarzo (componentes mayoritarios del sistema).

La detección de fases minerales ricas en hierro aporta indicios concluyentes para averiguar el origen de la elevadísima concentración de hierro que hay en las aguas subterráneas del sistema en determinados sectores.

En principio cabe destacar la altísima proporción de cuarzo alotriomorfo y feldespatos cálcicos y sódicos en las muestras, como mínimo en un 86%.

También existe una fracción de minerales pesados que, aunque su proporción sea baja, influyen sustancialmente en la composición de las aguas subterráneas. Entre estos, el más abundante es la turmalina, seguidos por la epidota, granates alterados, andalucitas y anfíboles.

Aparece además de forma abundante minerales foliares relativamente orientados, que, por su naturaleza y por haber tan sólo dos áreas fuentes posibles (macizo metamórfico de Santa María la Real de Nieva y el Sistema Central), aportan información relevante sobre el origen de las arenas dunares. A este respecto cabe destacar la alta impregnación ferruginosa asociada a las coronas de reacción de los minerales esquistosos, siendo ésta una de las principales fuentes de la elevada concentración en hierro en las aguas subterráneas.



Los minerales accesorios detectados en la fracción densa fina y muy fina de las distintas láminas son: laminillas fibrosas de mica (biotita, moscovita y clorita), apatito, anfíboles, epidota, sillimanita, distena, estaurolita, rutilo, zircón y turmalina. Se ha detectado además fases minerales que podrían corresponder a granates chagrinados con alto grado de alteración y otras alteritas que no ha sido posible determinar. Estos minerales parecen proceder de la paragénesis de turmalina, zircón y estaurolita (*Hdez. Pacheco, 1969*).

El hierro detectado en las láminas delgadas aparece en forma de manchas ferruginosas, aparentemente piritosas, con diseminados finos intergranulares y cristales subhedrales (puntitos blancos) y masas framboidales a lo largo de los poros dentro de una matriz carbonatada. Las fases minerales parecen corresponder a piritita, marcasita y siderita como principales fuentes de ión hierro en el sistema, especialmente en la UHA septentrional oriental.

El conteo modal de las muestras se presenta en las Tablas 3.95 y 3.96, adoptando el formato propuesto por *Alcalá del Olmo, 1975*, se presenta a continuación para las fracciones de tamaño modal fina y muy fina y orientadas de norte a sur.

COMPONENTES PRINCIPALES

	CUARZO	FTO POTÁSICO	FTO CALCICO-SODICO	MICAS	ALTERITAS
INV-104 1,8 M	51	36	8	2	3
INV-104 13,7 M	49	39	8	2	2
INV-204 1,2 M	50	41	7	1	1
INV-245 1,3 M	47	33	7	8	5
INV-245 15,5 M	48	35	6	6	5

Tabla 3.95. Contaje modal láminas delgadas. Componentes mayoritarios.

	TURMALINA	CIRCÓN	GRANATE	RUTILO	ESTAUFOLITA	DISTENA	ANDALUCITA	SILLIMANITA	EPIDOTA	HORNBLANDA	CLORITA	APATITO	ALTERITA
INV-104 1,8 M	22	9	12	2	2	1	7	1	29	4	3	5	3
INV-104 13,7 M	19	8	12	1	1	1	8	2	28	3	2	3	12
INV-204 1,2 M	13	10	15		2		16		26	9		1	8
INV-245 1,3 M	12	13	10	3	1	1	10		22	2	3	12	11
INV-245 15,5 M	11	12	10		4	1	13	1	21	2	2	11	12

Tabla 3.96. Contaje modal láminas delgadas. Fracción pesada.

En este contexto, destaca la composición modal y mineral (primaria y secundaria) de los litotipos. La asociación mineral está constituida por las fases descritas en el apartado siguiente.

6.1.3.1. Minerales mayoritarios

- Cuarzo (47-51%), formando de modo habitual mosaicos granulares escasamente suturados con indicios de recrystalización.



- Plagioclasa: en porcentaje modal variable (6-8%). Su composición mineral detallada y fórmula estructural es la siguiente: $(\text{Na,Ca}) (\text{Si,Al})_4 \text{O}_8$ (andesina).
- Feldespato potásico, con un rango de porcentaje modal de 33-41 %. Generalmente, a tenor de las observaciones petrográficas, se trata de ortosa, si bien aparentemente aparecen fases subordinadas en zonas afectadas por deformación o circulación de fluidos, donde la fase predominante aparentemente es microclina, (fórmula estructural: $\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$).
- Biotita: abundante (1-8% modal). Se trata del único filosilicato primario presente en todas las muestras de este litotipo. Su formulación teórica estructural es: $\text{K (Mg, Fe)}_3 (\text{Al, Fe}) \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH, F})_2$.

6.1.3.2. Fracción pesada

- Epidota: En porcentaje modal considerable (hasta 29%).
- Anfíbol: siempre presente en un porcentaje modal considerable (hasta 9%). Su composición corresponde a diferentes términos de hornblenda, lo que puede responder a la abundancia de magnesio detectada en el sistema.

El circón, el apatito y los minerales opacos son habituales. De modo ocasional se han observado algunos pseudomorfos moscovítico-cloríticos de cristales de cordierita, así como desarrollos de turmalina intersticiales en las texturas de fragmentación en feldespatos.

6.1.3.3. Alteritas

Los productos de alteración presenta en ocasiones porcentajes significativos. En algunos casos no han podido ser identificados. Las fases de alteración detectadas corresponden a

- Biotita: su alteración es principalmente clorítica resultando como productos la clorita, rutilo, esfena y opacos (ilmenita-magnetita). Algunos de los cristales presentan una alteración cálcica, representada por la formación de epidota.
- Cordierita: reemplazada por moscovita y clorita.
- Plagioclasa: presenta alteración principalmente sericítica que afecta a los núcleos de cristales y a los bordes cristalinos.

Además de las alteraciones citadas, en este litotipo se identifican, con cierta frecuencia, venillas o gránulos de calcita intersticial diagenética, sin poder determinar su posible composición magnesiánica. También manchas ferruginosas, aparentemente piritosas, con diseminados finos intergranulares y cristales subhedrales (puntitos blancos), además de masas framboidales encajadas en los poros de la matriz carbonatada.

Como conclusiones del apartado se indican los siguientes aspectos:

La litología de la zona viene condicionada por el área madre donde se diferencian dos unidades:

- Cuarcitas y pizarras de edad Cámbrico-Ordovícicas, que generan unas facies de naturaleza litoarenítica.
- Granitos y rocas metamórficas de grado alto y medio, que generan unas facies de naturaleza arcósica.

Así nos encontramos con abanicos de distinta composición geológica que, cuando se unen entre sí, forman litologías mezcladas y configurando un sistema dunar mixto donde se combinan sedimentos originarios del Sistema Central y del macizo metamórfico emplazado al sureste del área de estudio.

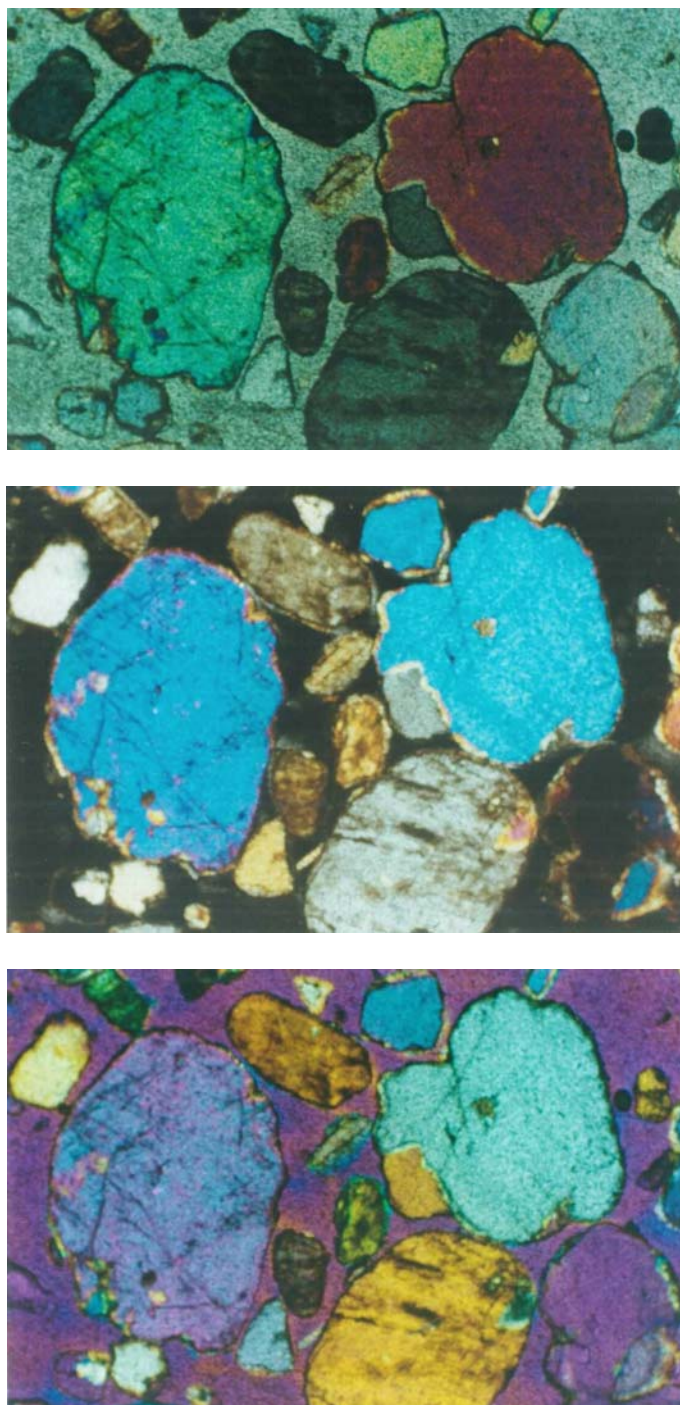
Con respecto a la hipótesis de que el principal origen de los materiales del sistema dunar es el Sistema Central (deducido por técnicas morfoscópicas), esta hipótesis es refrendada mediante técnicas petrográficas por el porcentaje de feldespatos presentes en el área, predominando las fases potásicas en el extremo sur, aumentando ligeramente la fracción cálcica y sódica hacia el norte.

El otro área fuente posible es el macizo de Santa María la Real de Nieva. Se trata de una roca metamórfica esquistosa de bajo grado de tonalidad gris-verdosa y superficie ocre con un moteado carbonoso. Al microscopio presenta un componente mayoritario cuarzo-micáceo con feldespato potásico, micas e hidróxidos de hierro, con mayor abundancia de moscovita que de biotita. Se aprecia además fragmentos de andalucita y alteritas. Su aportación al sistema dunar es evidente en vista de la composición de las arenas, lo que induce a pensar en un sistema de aporte eólico centrífugo desde el macizo (*Alcalá del Olmo, 1975*). La elevada concentración de hierro en el acuífero, especialmente en la UHA septentrional oriental, corrobora este proceso.

A este respecto cabe destacar la alta impregnación ferruginosa asociada a las coronas de reacción de los minerales esquistosos, siendo esta una de las principales fuentes de la elevada concentración en hierro en las aguas subterráneas. Esta roca esquistosa ha sido empleada para revestir las paradas del caz, por lo que cabe esperar que haya una fuente de hierro adicional en interacción con el agua de recarga.

Las fotografías tomadas se presentan en el Anexo 3.2.5.1. *Documentación gráfica. Fotografías microscópicas de láminas delgadas*, donde pueden ser observados los indicios aportados.

La descripción detallada de la totalidad de las muestras no ha sido llevada a cabo, ya que la pretensión principal ha sido emplear esta metodología para cumplir unos objetivos concretos, como son el apoyo a la caracterización de la fracción sólida y obtener indicios referentes a la procedencia de los sedimentos y a la abundancia de hierro y magnesio en el sistema. A modo de ejemplo, se presentan tres fotografías de lámina delgada del punto inv-245 (Figs. 3.61 a, b y c).



Figs. 3.61 a), b) y c). Fotografías microscópicas con distintos aspectos de la muestra INV-245 1,3 m.

6.1.4. Capacidad de intercambio de bases y cationes de las arcillas

La presencia de arcillas en el agua de recarga es especialmente relevante si existen variaciones importantes en pH, composición catiónica o TSD con el agua nativa. En estas condiciones las arcillas pueden estar en condiciones tan inestables como para penetrar en los poros del acuífero incidiendo en su colmatación (Pyne, 1995).

Por ejemplo, la presencia de esmectitas (en concreto montmorillonita) es muy sensible a los cambios en TSD durante las operaciones de recarga. La caolinita es más tendente a originar procesos colmatantes, dada su mayor movilidad en el agua de recarga por suspensión, originando aguas zarcas o cárdenas.

De este modo, destaca la enorme importancia que adquiere la presencia de un tipo determinado de arcillas en las aguas de recarga, siendo recomendable su discretización mediante difracción de Rayos X u otra técnica similar.

Con objeto de realizar previsiones cualitativas generadas de los procesos de interacción agua-sólidos arcillosos en suspensión-suelo. La siguiente tabla representa la capacidad de intercambio catiónico de determinadas arcillas (en relación molal) con respecto a la superficie de contacto (en m^2/g). Dado que no ha sido posible estudiar la composición de las arcillas en el agua de recarga durante los dos primeros ciclos, queda justificada la conveniencia de acometer esta tarea en un futuro, perfilado ahora el marco para su estudio posterior. En la Tabla 3.97 se presentan los valores de la capacidad de intercambio catiónico de determinadas arcillas y minerales.

CAPACIDADES DE CAMBIO DE ARCILLAS SELECCIONADAS Y MINERALES		
CONSTITUYENTES	CEC (meq/L)	(m^2/g)
Ceolitas.	230-620	Superficie del Área >1000
Materia Orgánica.	150-500	
MnO ₂ (pH 8).	260	
Materia de suelo orgánico.	>200	
Vermiculita.	100-150	750-800
Esmectita.	80-150	600-800
Montmorillonita.	80-150	600-800
Saponita.	80-120	700-800
Suelo de Micas.	20-60	
Suelo de Arcilla.	5-60	150-200
Haloisita (4H ₂ O).	40-50	21-43
Clorita.	4-47	25-40
Illita	10-40	100-200
Suelo de marga arcillosa.	4-32	150-200
Paligorskita	20-30	
Suelo légamo de margas.	9-27	50-150
Varios suelos.	4-25	
Suelo de margas.	8-22	50-100
Glaucónita.	10-20	
Suelo con margas arenosa.	2-18	10-40
Caolinita.	3-15	10-20
Haloisita (2H ₂ O).	5-10	
Suelo arenoso.	2-7	
Óxidos e Hidróxidos.	2-6	14-90
Pirofilita.	4	
Basalto.	0.5-3	
Cuarzo, feldespatos.	1-2	1-3

Tabla 3.97. Capacidad de intercambio catiónico de determinadas arcillas y minerales (en relación molal) con respecto a la superficie de contacto (en m^2/g). Tomado de Dragun, 1985 (en Dragun, 1988).



El impacto de la recarga con aguas dulces en humedales salinos, propuesto por la corporación municipal de Coca como compromiso electoral en las elecciones de 2002, debe ser estudiado con detalle antes de llevar a cabo actuaciones. La recuperación de la laguna de las Heras parece factible, si bien el agua empleada debe ser modificada antes de su vertido. Para ello la recarga artificial inducida se perfila como la alternativa más idónea, según se analiza en el Bloque 5.

El medio receptor en la zona de humedales tiene predominio de suelos salinos, como ocurre en gran parte del margen occidental de la *Cubeta*. Las arcillas tienen una gran cantidad de sodio estable en las condiciones termodinámicas naturales. La recarga con aguas bicarbonatadas cálcicas constituye un claro impacto ambiental, puesto que la arcilla evolucionará de dos formas diferentes:

- Composicionalmente se producirá un intercambio catiónico de sodio por calcio, convirtiendo la arcilla sódica en mayoritariamente cálcica.
- Texturalmente, las montmorillonitas cálcicas tienen forma planar, mientras que las sódicas presentan una morfología planar alargada. La rotura del equilibrio dinámico producirá la entrada de estas partículas a los poros del acuífero, obstruyéndolos de forma irreversible.

De este modo, además de conocer los sólidos en suspensión y sólidos disueltos en el agua de recarga, conviene analizar composicional y texturalmente las arcillas en aras de establecer previsiones de cara a la tasa de colmatación.

Las modificaciones cualitativas sobre las aguas de recarga representan un proceso complicado que permite minimizar el impacto ambiental generado durante la recuperación por modificación de las condiciones sustanciales. La recarga artificial inducida se perfila como la técnica más apropiada, de costes aceptables y relativa facilidad de implantación y aplicación.

6.1.5. Capacidad de autodepuración del terreno. Alternativas de actuación

La forma de eliminar el nitrógeno en acuíferos arenosos se basa en un sistema de inyección/reposo de residuos que favorecen las reacciones de nitrificación/desnitrificación.

El nitrógeno es eliminado casi por completo, quedando restos en forma de nitratos. Su distribución tiende a aumentar con la profundidad hasta los 15-20 metros, a partir de la cual se incrementan las reacciones de desaireación. Los procesos de dilución por las aguas de recarga han manifestado importantes disminuciones en las inmediaciones del caz de recarga, mientras que en zonas alejadas de su influencia se ha apreciado un incremento.

El fósforo se elimina favoreciendo la precipitación de fosfato cálcico.

En el caso de utilizar las aguas para regadíos, es previsible que presenten carencias en hierro y magnesio para las necesidades de las plantas, por lo que sería aconsejable en la práctica agrícola suministrar al suelo estos elementos, sólo en caso de constatarse un bajo contenido de ellos.

Resulta absolutamente recomendable la instalación de filtros para el tratamiento de los efluentes o sistemas parecidos, como son:

– Balsas de oxidación para la neutralización de los gérmenes presentes en las aguas residuales. Este método tiene la desventaja de que en zonas de alta evaporación la velocidad de producción de efluentes sobrepasa a la capacidad de este método para eliminarlos.

– Tratamiento suelo-acuífero (SAT): el método consiste en la percolación del efluente a través de una capa de suelo suficientemente gruesa, que actúa como un medio mineral granular, con los suficientes poros como para alojar una abundante microflora. Su utilización óptima es en zonas permeables por lo que resulta un método apropiado para la zona de estudio. A este método se le suma la capacidad desinfectante del suelo.

– Desinfección por bacterias fijadoras fijadas a un medio granular que reúna las siguientes características:

- Gran superficie de contacto y gran tamaño de poro para la fijación de las bacterias.
- Altas concentraciones de bacterias.
- Aireación continua para favorecer el metabolismo de las bacterias.

Se crea así un ambiente en donde se puede desarrollar una biomasa de alta concentración que producirá una retención físico-química de sólidos en suspensión y microorganismos.

La purificación por medios biológicos (filtro verde o membranas biológicas) es una simple utilización del suelo que acelera el efecto producido durante la lenta infiltración del efluente en el terreno.

La tipología de los suelos ha constituido, además, un factor clave para la determinación de unidades homogéneas dentro de la *Cubeta*, o UHAs, según se ha descrito en el Bloque 2.

7. PREVISIÓN DE LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-SUELO MEDIANTE CÓDIGOS DE MODELIZACIÓN

En este apartado se lleva a cabo la metodología descrita para el cálculo de procesos de especiación-solubilidad mediante códigos de modelización y el estudio de tasas de reacción en distintos puntos del sistema.

Una vez conocido en cierto grado la distribución de procesos hidroquímicos en el acuífero, gracias a la elaboración de cartografías específicas de isocontenidos e isorrelaciones, ha sido posible seleccionar un grupo de alícuotas representativas de los distintos ambientes hidrogeoquímicos, por criterios de representatividad.

Estas muestras seleccionadas para su tratamiento son los polos fríos, el agua de recarga y los puntos de los perfiles hidroquímicos P-1, 7, 11 y 15, perfiles representativos de las distintas tipologías presentes en el sistema.

7.1. CÁLCULOS DE ESPECIACIÓN-SOLUBILIDAD MEDIANTE CÓDIGOS DE MODELIZACIÓN

Los modelos de especiación-solubilidad permiten calcular la cercanía de las reacciones heterogéneas (solución-mineral) con respecto a la situación de equilibrio termodinámico. Para ello se basa en el valor de los índices de saturación de la fase acuosa con respecto a ciertas fases minerales, cuya presencia/ausencia es un indicador del equilibrio/desequilibrio termodinámico.

Se ha llevado a cabo la carga de datos de la analítica de las muestras seleccionadas en los códigos WATEQ4F y PHREEQC, ya que permiten su empleo sin datos relativos a la concentración de elementos traza y del Eh del medio.

El código PHREEQC incorpora además la modelación directa e inversa con una incertidumbre analítica en sistemas con un número de fases bastante bajo.

La principal limitación es la inherente a la fiabilidad de los códigos empleados, determinada, en gran medida, por la base de datos termodinámica asociada. Algunas características de los códigos empleados se adjuntan en el Anexo 3.3. *Códigos de modelización hidrogeoquímica.*

La descripción de las pautas de especiación de los elementos del sistema es realizada separadamente para los elementos cuya especiación está controlada por sus propias características químicas, como son los cationes y la sílice; y aquellos otros cuya especiación depende además de las características del sistema, como son los aniones (cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, grupos hidroxilos, etc.), puesto que su carácter acomplejante de cationes está afectado por las características físico-químicas de la solución. Este carácter de ligandos impondrá una serie de peculiaridades en la especiación de algunos cationes.

La especiación del primer grupo, integrado por los macroconstituyentes catiónicos tipo SO_2 , **Ca, Mg, Na y K** es similar en todas las muestras. Aparecen, generalmente, como iones libres y representan más de un 96,5% para el SiO_2 , un 60% para el Ca y un 38% para los restantes.

El porcentaje restante del total forma complejos con ligandos bicarbonatados y sulfatados (aniones de mayor concentración en este tipo de sistemas) y, en una menor proporción, con grupos hidroxilos y cloruros.

El segundo grupo comprende aquellos elementos cuya especiación está controlada, además de las características químicas intrínsecas a cada elemento, por las características físico-químicas de las soluciones.

Se han calculado las fases minerales disueltas en cada muestra en mmoles/l a partir de sus índices de saturación respectivos. Las fases presentes son halita, dolomita, calcita/aragonito y anhidrita, además de distintas fases minerales silicatadas no determinadas en el período preoperacional (julio de 1999), pero sí en el operacional (febrero de 2003).

Estos valores aparecen extraídos en las tablas de los Anexos 3.1.2.1 y 3.1.3.1 para los períodos pre y operacionales respectivamente. Las determinaciones realizadas en la fase postoperacional del primer ciclo carecen de iones macroconstituyentes, al haberse centrado en determinaciones de parámetros inestables, hierro y nitratos.

La especiación del primer grupo de macroconstituyentes catiónicos (Ca, Mg, Na, K y sílice) resulta de la interacción de las aguas subterráneas a una temperatura de 12 a 14°C, con aguas de recarga más frías (procedentes de cauces superficiales durante la época invernal, con medida de temperatura puntuales de hasta 5,2°C en enero de 2003).

Se ha simulado la interacción de las aguas de recarga con las aguas subterráneas del sector septentrional del caz (perfil 1), central (perfiles 7 y 11) y meridional (perfil 15).

• **Especiación del calcio**

La especiación del Ca en los mismos sectores diferenciados presenta ligandos y fases minerales similares en todos ellos, que son Ca^{+2} , CaSO_4 , CaHCO_3^+ , CaCO_3 y CaOH^+ , si bien las proporciones son variables.

Los procesos de mezcla con aguas de recarga más frías que las del acuífero tienden a generar precipitados de carbonato cálcico. Este proceso es ligeramente superior en los sectores norte y central que en el sur, mientras que en la UHA meridional oriental es muy inferior (del orden de cuatro veces) en la zona de la Fuente Fría, donde la concentración inicial de calcio también es inferior, al ser aguas más evolucionadas y haber abundantes procesos de intercambio catiónico de calcio por magnesio y sodio en el acuífero.

Las fases cálcicas presentes en el agua son la anhidrita, aragonito, calcita, dolomita: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, y anhidrita/yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. En general, se presentan en

sobresaturación las fases carbonatadas más que las sulfatadas, con mayor abundancia de calcita, aragonito e incluso dolomita en los sectores norte y sur que en el central.

Las fases sulfatadas se presentan en mayor concentración en el sector norte, seguido del sur, quedando en el central las concentraciones menores.

- **Especiación del magnesio**

La especiación del Mg presenta diferentes iones y fases entre los distintos sectores.

Los iones en disolución son Mg^{+2} , MgSO_4 , MgHCO_3^+ , MgCO_3 y MgOH^+ , con mayor abundancia en el sector meridional que en el septentrional.

En los sectores norte y sur aparecen fases minerales de crisotilo: $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, dolomita: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, sepiolita: $\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_7 \cdot 5\text{OH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, y talco: $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, mientras que en el central aparece exclusivamente dolomita como fuente de magnesio, y en concentración cercana a la mitad que en los sectores extremos.

Las proporciones son parecidas, excepto para la sepiolita, que se presenta en mayor concentración en el sector sur que en el norte.

- **Especiación del sodio**

En cuanto a la especiación del Na, las formas en que aparece este ión en el sistema son variables y generalmente iónicas, excepto en forma de halita.

Las formas más abundantes son Na^+ , NaSO_4^- , NaHCO_3 , NaCO_3^- y NaOH , predominando la forma de sodio libre, sulfato y bicarbonato frente a las restantes.

La abundancia de sodio es mayor en el sector septentrional (4,35 moles), donde triplica la concentración media de los sectores restantes. En la UHA meridional es mayor que en la central (1,74 frente a 1,08 moles), más que por evolución de las aguas por presencia de procesos contaminantes salinos e indicios de intrusión salina continental.

Debe tenerse en consideración que los procesos de mezclas de aguas han actuado más en los sectores de menor concentración que en el norte en la fecha del muestreo.

- **Especiación del potasio**

La especiación del K suele aparecer en forma iónica, excepto en forma de silvita.

Las formas iónicas son K^+ , KSO_4^- y KOH , en orden decreciente.

El sector con mayor abundancia de potasio en disolución en las aguas subterráneas es el meridional, seguido del septentrional y central.



- **Especiación de la sílice**

Dado que una de las finalidades principales del estudio fue determinar qué fases minerales ferromagnesianas influyen en gran medida en la calidad hidroquímica de las aguas subterráneas, el trabajo se ha centrado en las alteritas, rechazando las fases identificadas al microscopio de luz polarizada de composición química conocida y que pueda oscilar entre límites estrechos.

Destacamos dos aspectos en las muestras seleccionadas:

- Son alteritas y, en consecuencia, sus fases minerales representan una composición original con productos de alteración.
- Permiten en muchos casos realizar perfiles desde el centro (condiciones iniciales de cristalización) hacia los bordes (superficie más alterada), para evaluar la evolución de la composición durante la alteración.

El resultado analítico permite conocer las variaciones de la fórmula estructural sobre las fases conocidas y alteradas, y averiguar la composición química de las alteritas que corresponden a distintos litotipos, con gran incidencia en los procesos de interacción del agua subterránea y de recarga con los minerales que constituyen los sedimentos.

La especiación de la sílice en este tipo de soluciones es función, también, de la basicidad de las mismas.

No se ha realizado una analítica de sílice específica en la fase preoperacional (1999), tan sólo en la operacional (2003). Se ha determinado la sílice total en el sistema, sin disociación entre óxido o ácido. Estas pueden corresponder a cuarzo (SiO_2) o feldespato ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Aparecen en concentraciones medias de 16,15 mg/l de cuarzo y 80,44 mg/l de feldespatos, lo que corresponde a 0,31 meq/l en ambos casos. Las concentraciones mayores se han registrado en los medios menos alcalinos (no hay ningún medio *ácido puro*).

En cuanto a la interacción de las aguas subterráneas de la **zona norte del acuífero** con las aguas de recarga (perfil 1), fase operacional (muestras RCH 5 y 6), se han realizado cálculos de especiación con el código PHREEQC, convergiendo tras nueve iteraciones.

Los resultados de la simulación desvelan la presencia de cuarzo puro y calcedonia como producto de la interacción del agua de recarga (más frías) y las del acuífero. Los índices de saturación calculados oscilan en torno a 0,65 bajo unas condiciones Redox de $E_h = 0,76$ V. La fuerza iónica es de 0,02 para un pH del medio de 8 y una temperatura de 14°C, con liberación de iones hidronios doble que de oxidantes.

Se ha detectado, además, la presencia de otras fases silicatadas diferentes, de composición química H_4SiO_4 , H_3SiO_4^- y $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$. En condiciones de pH superiores a 8 aumenta el porcentaje de H_3SiO_4^- a medida que se incrementa el pH de la solución con respecto a las otras fases.

La presencia de sílice ionizado en las aguas contribuye a la constitución de un par ácido-básico, $\text{H}_4\text{SiO}_4/\text{H}_3\text{SiO}_4^-$, activo en estas soluciones y variable con la temperatura, que puede condicionar la formación de precipitados en el medio, con incidencia directa en la colmatación de los poros por cementación y, consecuentemente, en la tasa de infiltración del acuífero.

La especie en solución H_4SiO_4 (acuosa) varía de forma inversa con el aumento de pH y de la alcalinidad.

Los valores más altos suelen corresponder a las soluciones más alcalinas del conjunto, mientras que la sílice presenta mayor inestabilidad cuanto menos alcalinas son las soluciones.

Por lo tanto, la especiación de la sílice está condicionada por variaciones de pH, T^a y posiblemente Eh (resultados con 0,76 V) y presión (las simulaciones se han realizado a 1,1 atmósferas), aunque estos supuestos no están confirmados.

En cuanto a los procesos de interacción en el **sector central** del acuífero (perfiles 7 y 11), fase operacional (muestra RCH 10), se han realizado cálculos de especiación paralelos aplicando el también el código PHREEQC.

Las aguas de partida presentan una alcalinidad menor y mayor porcentaje en potasio, sulfuros y hierro. En las mismas condiciones de la simulación previa, la sobresaturación en silicatos presenta un rango inferior (0,49), la fuerza iónica es de 0,0086 para un pH del medio de 8 y una temperatura de 14°C.

En este medio se aprecia una mayor influencia de fases sulfurosas y carbonatadas.

Los procesos de interacción del **sector meridional** (perfil 15), fase operacional (muestra RCH 17), según los resultados de especiación-solubilidad del mismo código muestran un grado de sobresaturación en sílice de 0,61 (ligeramente inferior al sector septentrional). Las fases calculadas son similares. La fuerza iónica es de 0,014 para condiciones termodinámicas similares y un potencial Redox de 0,73 V.

De este modo, hay bastante similitud entre los sectores septentrional y meridional, apreciándose diferencias relevantes en la central en cuanto a los valores de especiación y solubilidad de la sílice, donde es menor.

- **Especiación del hierro**

El único microconstituyente determinado ha sido el **hierro total**. Su determinación se ha llevado a cabo en la etapa postoperacional, al término del 1.^{er} ciclo de recarga.

Este metal se presenta formando complejos con distintos ligandos, en función de la concentración del ligando libre y de la afinidad del ligando por el catión.

Las fuentes primarias de Fe en las rocas plutónicas del área madre de los sedimentos del sistema dunar son los silicatos ferromagnesianos (piroxeno, anfíbol y biotita), y los minerales minoritarios en este tipo de rocas detectados en las arenas, tales como pirita, magnetita, hematites, etc.

En condiciones reductoras, el Fe es soluble y móvil como Fe (II) por debajo de pH en torno a 7-8 y, por lo general, en forma libre Fe^{2+} . El Fe funciona, por lo común, con los estados de oxidación II y III originando compuestos ferrosos y férricos y, en condiciones excepcionales, como Fe (IV) –muy poco estable– y como Fe (VI) (ferratos) (Buil, 2001).

Conocida la distribución del pH en el acuífero, con predominio de medios más ácidos en los extremos norte y sur, las condiciones más propicias para la estabilidad del hierro, y al mismo tiempo, de generación de compuestos incrustantes de baja solubilidad, se dan en el sector central, especialmente en las inmediaciones de la confluencia de los ríos Voltoya y Eresma.

La **especiación del Fe** presenta una pauta común en todas las muestras del sector central, con predominio de complejos con hidróxidos, y de Fe (II) en forma libre. Ambos complejos se asocian con frecuencia a complejos carbonatados.

La carencia de datos de iones macroconstituyentes de la mayor parte de las muestras impide el cálculo de índices estadísticos.

En los sectores septentrional y meridional las pautas de especiación del Fe presentan una afinidad diferente por los distintos ligandos, según se trate de Fe en estado reducido u oxidado.

Los complejos del Fe con grupos OH^- están dominados por el Fe (III), cuyas constantes de estabilidad en la formación de complejos con grupos hidroxilos son más elevadas que para el resto de los ligandos presentes en solución. El Fe (II) forma complejos carbonatados e hidroxilos; con constantes de solubilidad similares.

En función de su estado de valencia, el Fe pertenece al grupo de cationes tipo-a, Fe (III), o tipo a', Fe (II) definidos por Turner (Turner *et al*, 1981). Los cationes tipo-a muestran una especiación dominada por la hidrólisis, mientras que los cationes tipo-a' pertenecen al grupo de cationes con especiación variable.

En cuanto a su relación con el pH, el porcentaje de especies de Fe (II) disminuye con el aumento de pH, mientras que el porcentaje de especies de Fe (III) aumenta. En este contexto, importa resaltar que la relación observada entre el porcentaje de especies de Fe y el pH guarda relación con la alcalinidad, de modo que las aguas más oxidantes son las más alcalinas y viceversa. De este modo, la presencia de hierro, además de estar controlada por el pH, estará también controlada por el potencial Redox, Eh, en mayor grado si cabe.

El siguiente diagrama de estabilidad del hierro muestra las condiciones de estabilidad de las distintas fases en función del pH y eH del medio. El pH medio del acuífero es 7,98 en la fase postoperacional, con valores extremos de 6,91 (punto 10) y 9,52 (punto 23). El Eh no ha sido medido en campo, si bien el valor medio calculado

por el código PHREEQC es de 0,76 V, condiciones idóneas para la precipitación y estabilidad del hidróxido de hierro (Fig. 3.62).

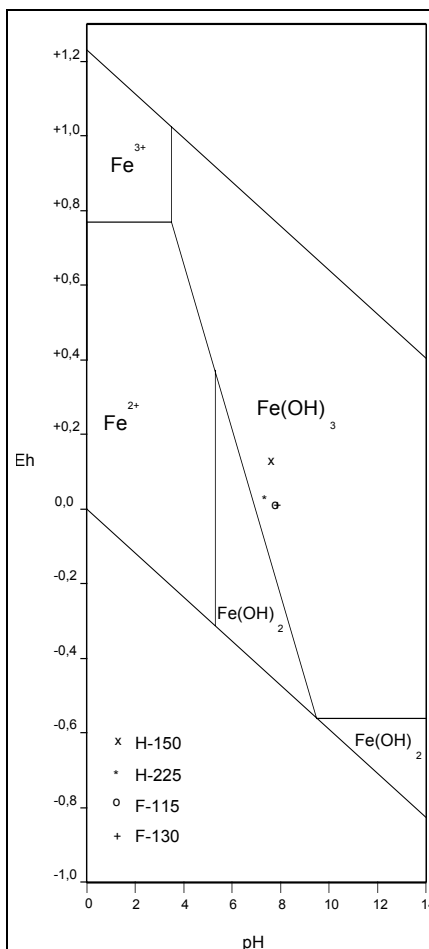


Fig. 3.62. Diagramas de estabilidad de los distintos ligandos ferrosos y fases en función del pH y eH del medio (tomado de Custodio y Llamas, 1983).

En la mayoría de los casos, el Fe (II) forma complejos con ligandos bicarbonatados, sulfatos, cloruros y grupos hidroxilos. Raramente lo hará con iones carbonatados y sólo en condiciones de pH superior a 9, circunstancias que concurren en los puntos 9, 18, 19 y 23, todos ellos en el sector central del acuífero.

En cuanto al porcentaje de cada especie con respecto al hierro total, existe un cierto predominio de la especie Fe(OH) en todas las muestras. En el intervalo de pH propio de estas aguas, la especie dominante de Fe (III), que correspondería a la especie Fe(OH)₄⁻, mientras que la especie más abundante de Fe (II) correspondería a la especie Fe(OH)₃⁻ (Langmuir, 1997), predominando la forma oxidada sobre la reducida.

En definitiva, en función del pH, el porcentaje de especies de Fe (II) mantiene una relación directa con el carácter reductor de las aguas, mientras que el porcentaje en especies de Fe (III) muestra un comportamiento inverso, mayor en aguas oxidantes y alcalinas.

- **Especiación del oxígeno disuelto**

La **especiación del oxígeno** está vinculada a la distribución de las fases de hierro en el sistema con distinto grado de oxidación, con menor porcentaje de hierro total en los sectores con más oxígeno.

Las diferentes condiciones térmicas detectadas en las aguas subterráneas y los procesos de interacción entre aguas de distintas temperaturas hace recomendable llevar a cabo estudios de modelización geotermométrica con las dos únicas muestras detectadas que presentan un cierto termalismo.

7.2. PREVISIÓN DE LAS PAUTAS DE REACCIÓN

7.2.1. Aproximación al conocimiento de los procesos de interacción agua-suelo

En este apartado se van a comparar las aguas de recarga y de los “polos fríos” con las aguas nativas analizadas tras las operaciones de recarga artificial (fase operacional). Se ha estudiado el aumento o disminución de macroconstituyentes sufrido por las aguas tras los procesos de interacción con el acuífero y con el sustrato salino de los humedales del Complejo Coca-Olmedo.

7.2.1.1. Comparación entre las aguas de recarga y los polos fríos

Las aguas extraídas en los pozos de riego son resultado de todo un conjunto de procesos de interacción agua-roca que han afectado a las aguas iniciales: el agua de lluvia, las aguas de recarga, las aguas nativas y las aguas entrantes en el sistema procedentes de otros compartimentos del acuífero.

El agua de lluvia considerada es la analizada en el pluviómetro de la estación 2502, Santiuste de San Juan Bautista, situado a una altitud de 820 m.

El otro polo frío es el agua de recarga, muestreada en el río Voltoya y en el inicio de la estructura de recarga.

Estas aguas serán utilizadas posteriormente para establecer los modelos factibles de transferencia de masas en el sistema recargado.

El siguiente hidrograma de Schoeller modificado representa las concentraciones de elementos mayores en las aguas de lluvia de la zona de estudio, las aguas de recarga y los polos fríos en orden ascendente de contenido iónico (Fig. 3.63).

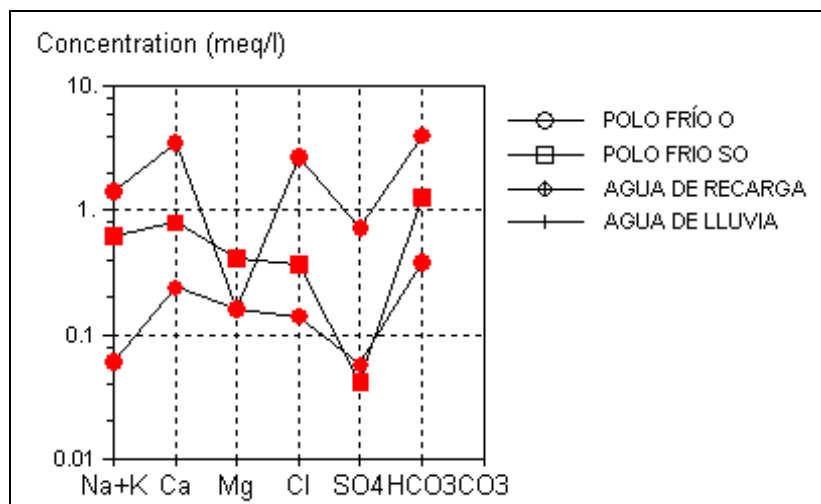


Fig. 3.63. Representación de las concentraciones de elementos mayores en las aguas de lluvia de la zona de estudio, las aguas de recarga y los polos fríos en un hidrograma de Schoeller modificado.

En la Tabla 3.98 se muestran las principales características físico-químicas de estos polos fríos deducidos de la caracterización previa.

La diferencia entre las aguas de los polos fríos y de riego reflejan el resultado de los procesos de liberación/retención que han operado en el acuífero.

Previamente al cálculo de balances de masas, se han estudiado los índices de saturación para los distintos grupos de muestras y simulado el flujo con procesos de mezcla durante la recarga (PHREEQC). Se ha establecido un valor del 5% para las determinaciones con alta incertidumbre (valor por defecto del código PHREEQC), como son las aguas de la ZNS (Fryar, 2001).

Se han calculado balances de masas con los iones Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃ y CO₃. No se han aplicado tiempos de residencia, dado que el objetivo principal es deducir pautas de reacción para su control mediante técnicas SAT.

En cuanto a las pautas de reacción principales, los aumentos más considerables en elementos mayores disueltos corresponden a SiO₂, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ y Na⁺ en los sectores septentrional y meridional, con fuertes incrementos de K⁺ y CO₃⁻ en el central.

El sílice experimenta un incremento generalizado como consecuencia del aumento de los procesos de hidrólisis de silicatos.

El hierro tiende a precipitar en el sector central, donde es muy abundante, presentándose en complejos ionizados en los extremos norte y sur de la *Cubeta*.

El Mg²⁺ muestra un ascenso en las aguas de riego respecto a las de recarga, como resultado de los procesos de precipitación de minerales magnesianos tipo sepiolita (presente en las facies Cuestas) y talco en el sector sur. Las aguas presentan sobresaturación en dolomita, en mayor índice en los extremos de la *Cubeta* que en el sector central.

La concentración de Ca^{2+} varía de forma paralela al magnesio, disminuyendo en el sector central oriental, donde aumenta la concentración en carbonato, el sodio y los hidróxidos de hierro. Los procesos operativos más representativos que operan en el circuito de recarga son aquellos de neoformación de filosilicatos cálcicos/calcita.

7.2.1.2. *Comparación entre las aguas de riego en la fase preoperacional y después del primer ciclo de recarga*

Se ha realizado una comparación entre las alícuotas obtenidas en puntos similares de la RCH en la campaña de 1999 y de 2003, con objeto de estudiar la influencia de la recarga artificial.

Estos puntos corresponden en su totalidad a pozos de riego que se encuentran en un circuito de interacción agua de recarga-aguas nativas-acuífero. El estudio comparativo de las alícuotas en dos períodos permite deducir ciertas pautas de reacción, y complementar los cálculos realizados por modelación directa.

Los puntos de agua con información química disponible de antes y después del primer ciclo de recarga, ubicados a una distancia suficientemente cercana al caz, son seis: cuatro pozos superficiales y dos sondeos profundos. Por tanto, es preciso restringir el estudio a una comparativa de las muestras en estas seis captaciones, que son:

- RCH-7-99 (=RCH-6-03⁵), sondeo profundo distante 1.158 m del caz de recarga artificial.
- RCH-16-99 o RCP-26 (=RCH-13-03), pozo de 10 m de profundidad distante 355 m del caz.
- RCH-18-99 (=RCH-22-03), sondeo profundo distante 623 m del caz. El nivel del agua ronda los 41 m de profundidad.
- RCH-20-99 (=RCH-14-03). Pozo de 14 m de profundidad, distante 742 m del caz.
- RCH-21-99 (=RCH-18-03). Pozo de 11 m de profundidad, distante 738 m del caz.
- RCH-24-99 (=RCH-17-03). Pozo de 17 m de profundidad, distante 177 m del caz de recarga.

RCH	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	CO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
99-7	97,0	8,9	19,0	1,9	16,0	324,0	0	2,0	2,4
2003-6	87	9	4	1	14	256	9	11	2
99-16	80,0	5,0	120,0	75,0	105,0	380,0	0	66,0	237,0
2003-13	79	4	140	60	122	317	< 8	148	186
99-20	72,0	5,0	129,0	48,0	97,0	322,0	0	62,0	205,0
2003-14	86	36	38	115	125	554	< 8	128	70
99-18	74	7	127	68	136	338	0	65	284
2003-22	99	1	4	7	29	196	17	26	17
99-21	68,0	12,0	101,0	83,0	85,0	379,0	0	41,0	283,0

⁵ Los números de los puntos de la red de control fueron modificados entre ambas campañas por motivos operativos y por mantener el criterio de numeración acorde con su posición.

2003-18	49	8	103	52	95	371	< 8	75	54
99-24	40,0	3,0	92,0	66,0	131,0	279,0	0	62,0	159,0
2003-17	40	5	86	51	57	412	< 8	55	29



	Pozo/sondeo de menos de 150 m de profundidad.
	Sondeo de profundidad superior a 150 m.

Tabla 3.98. Concentración en macroconstituyentes de los principales iones.

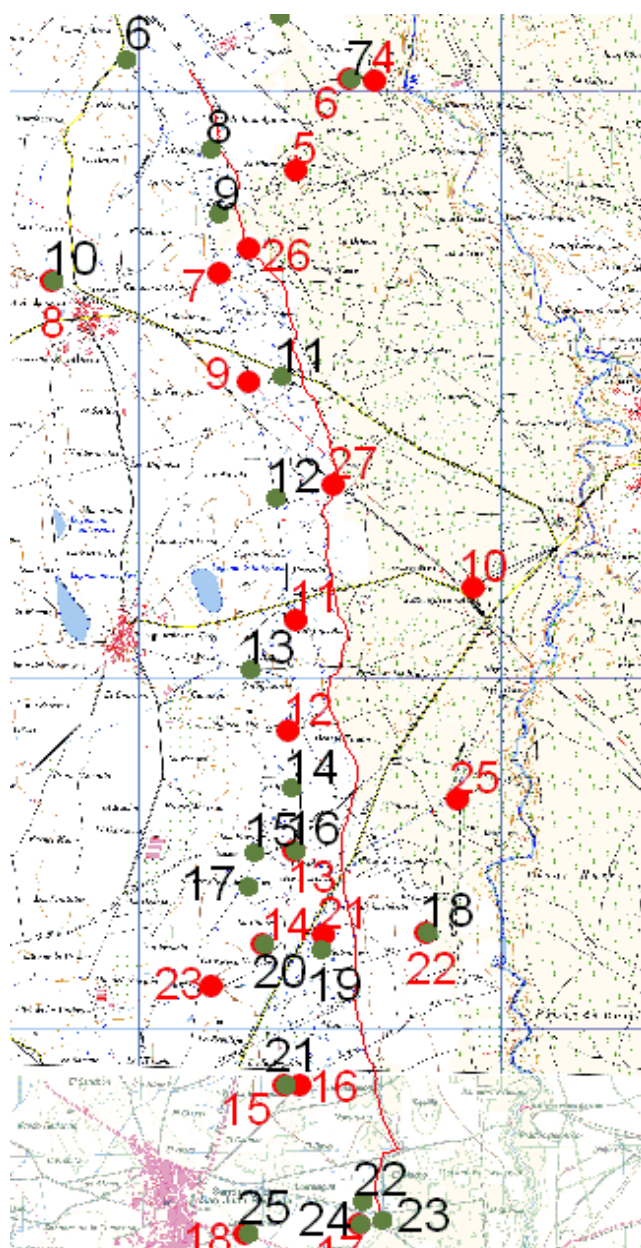


Fig. 3.64. Posición de los puntos de control con respecto al caz de recarga sobre la cartografía a escala 1:25.000 del IGN. Verde: RCH-99, Rojo: RCH-03. Estructura lineal: caz de recarga artificial. Escala aproximada: 1:60.000.

La tendencia evolutiva figura en el Aptdo. 7.3.2 y en los Hidrogramas 3.65 y 3.66 a) y b), en los que queda reflejada la concentración iónica de las muestras.

El hecho de haber realizado el muestreo en períodos diferentes (época estival para la situación preoperacional, e invernal para la operacional, conlleva un rango de variabilidad relativamente alto en los parámetros inestables, como es la temperatura del agua, etc.). Por este motivo se han considerado las variaciones entre estos parámetros con excesiva cautela, pensando más en las variaciones ambientales que en pautas evolutivas.

Observando los hidrogramas empleados destacamos los siguientes procesos y pautas de reacción:

En general se aprecia un descenso en la salinidad, conductividad y sólidos disueltos por simple dilución, que se manifiesta principalmente en los hidrogramas de *Stiff*. Las aguas manifiestan un desplazamiento dentro del hidrograma de *Piper-Hill-Langelier* hacia una situación de rejuvenecimiento, excepto en un caso.

Las aguas correspondientes a sondeos profundos (coloreadas en la Tabla del Anexo 3.2) se encuentran dentro del campo de las aguas de “*mineralización especial*” tipo bicarbonatadas sódicas y potásicas, como es natural en este tipo de captaciones. En general, se aprecia una disminución en la concentración de todos los iones, excepto de potasio, carbonatos y sulfatos. El sondeo más profundo presenta un aumento en sodio y carbonatos, indicando una alcalinización de las aguas profundas.

En el sondeo más profundo se manifiesta la mayor variación hidroquímica de las aguas, a pesar de encontrarse en el sector meridional oriental, relativamente aislado de la influencia de las operaciones de recarga. Esta brusca variación parece corresponder más a la profundidad de muestreo que a una variación como consecuencia de las operaciones de AR.

Las correspondientes a pozos superficiales no presentan una tendencia exclusiva, quedando las pautas de reacción condicionadas por su posición y contexto hidroquímico de ese sector del acuífero. El punto 16₉₉, situado en el sector central de la *Cubeta*, pinar del Sanchón y cabecera de la cacera de Betaya, presenta disminución en todos los iones, excepto en calcio, cloruros y sulfatos.

El punto 20₉₉ queda emplazado en la falda oeste del Cuerno de la Revilla, dentro del sector de mayor espesor del acuífero. Se trata de un sector con presencia de procesos contaminantes. El efecto de la recarga implica la movilización de iones dispuestos en la ZNS, con incremento en la concentración de sodio, potasio, magnesio, cloruros, bicarbonatos y sulfatos. Predominan las pautas evolutivas de sulfatación y calcificación.

El punto 21₉₉, situado junto al camino del Ramirón, al NE de Santiuste, presenta aumento en la concentración de calcio (en 3 ppm), cloruros, carbonatos y sulfatos. Las pautas evolutivas son parecidas al caso previo. El hidrograma de *Piper-Hill-Langelier* desvela un ligero proceso de “envejecimiento” de las aguas, correspondiente al proceso de salinización.

El punto 24₉₉, situado cerca de la confluencia de la cacera de aguas residuales de Santiuste y el caz de recarga presenta incremento en la concentración de potasio y bicarbonatos, con idéntica concentración en sodio. En todos los demás iones presenta un fuerte descenso, excepto en calcio (6 ppm).

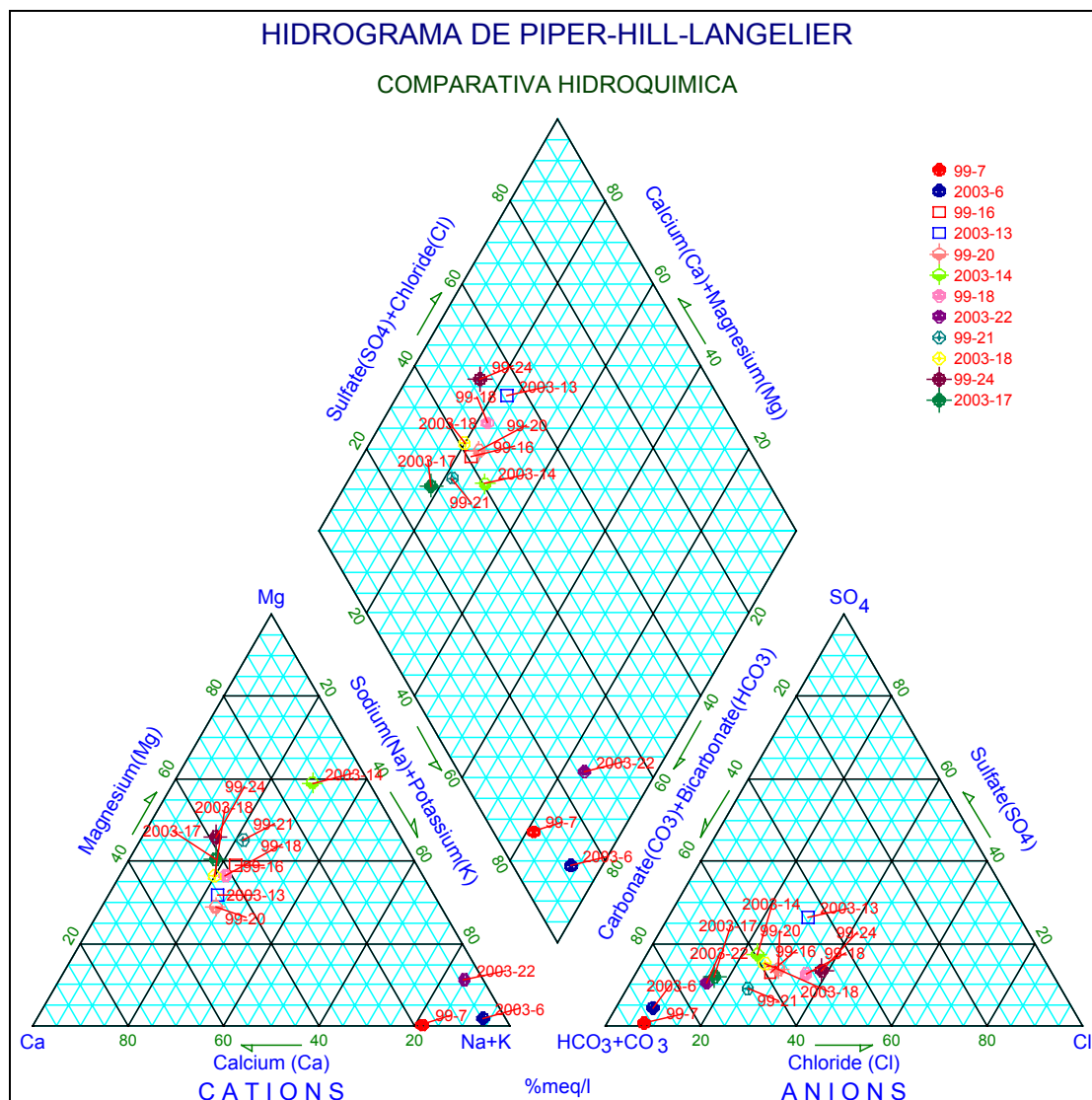


Fig. 3.65. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier para el estudio de la evolución hidroquímica de las aguas.

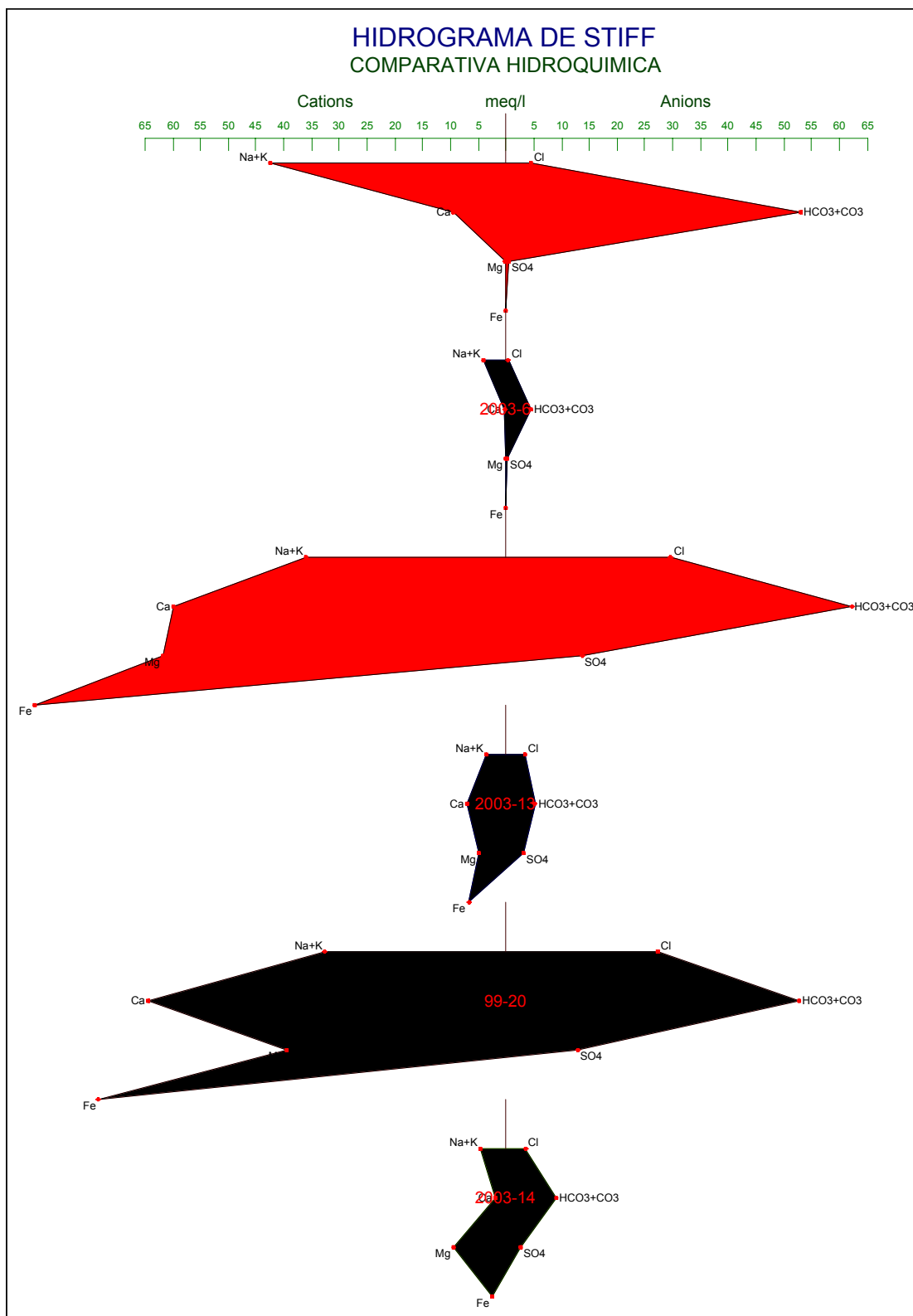


Fig. 3.66 a). Hidrogramas de Stiff para el estudio de la evolución hidroquímica de las muestras.

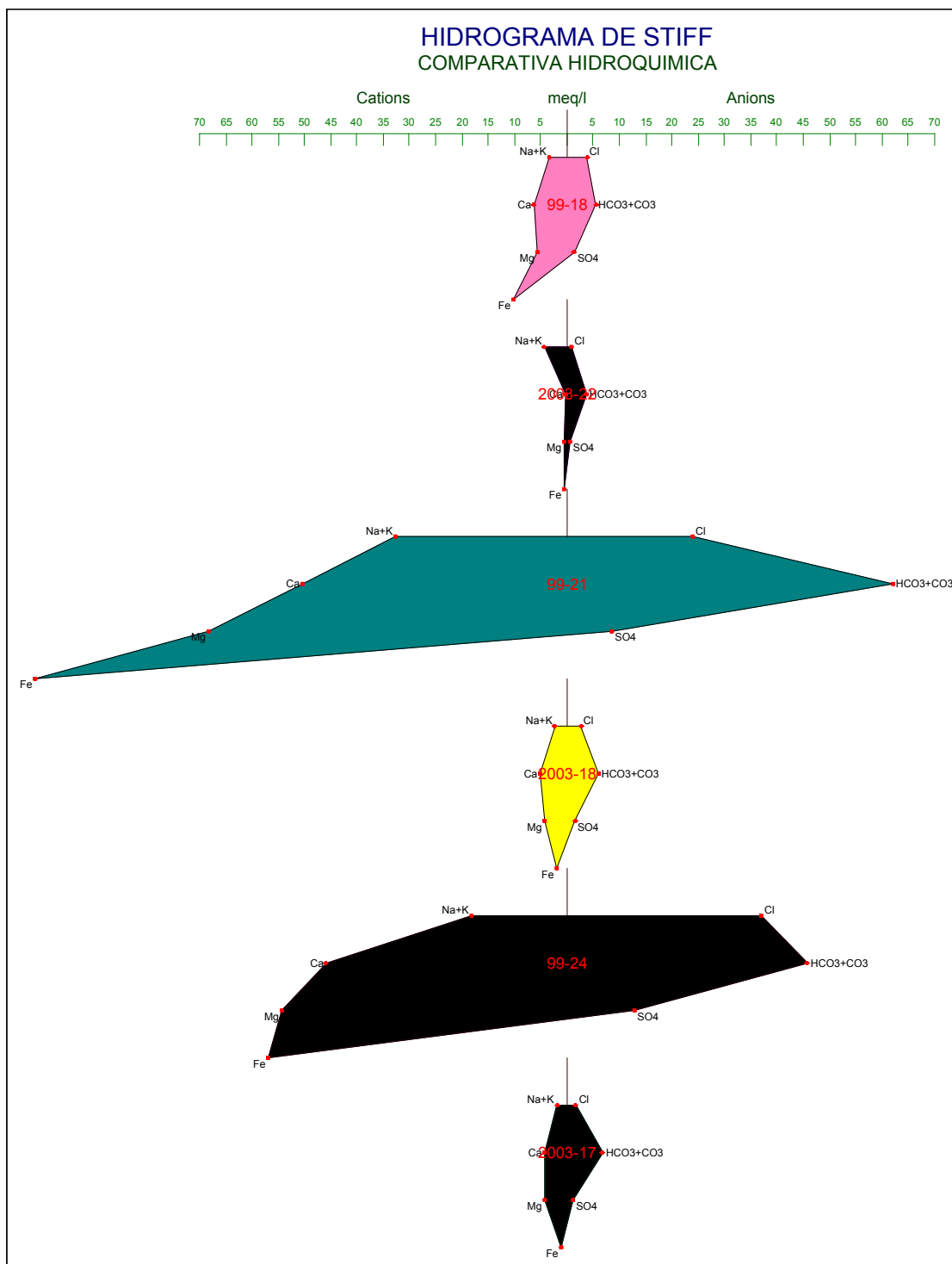


Fig. 3.66 b). Representación de las concentraciones de elementos mayores en las aguas de riego en las fases pre y operacional.

Estas diferencias entre las aguas de riego reflejan el resultado de los procesos de liberación/retención que han operado en el acuífero como consecuencia de la recarga artificial.

Los aumentos más considerables en elementos mayores disueltos corresponden a calcio, potasio, sulfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos, así como en hierro y

magnesio en el sector central del acuífero. Entre los menores cabe destacar el incremento de sílice como consecuencia de la degradación de cuarzo y feldespatos.

7.2.2. Pautas de reacción y transferencia

Una vez definida la composición del acuífero (Aptdo. 6); se ha seleccionado el conjunto de minerales susceptibles de interaccionar con las aguas de recarga en función de la mineralogía, tanto primaria como secundaria.

Entre los minerales más abundantes susceptibles de reaccionar con el agua de recarga, cabe destacar los siguientes (Tabla 3.99, formulación teórica):

Mineralogía primaria	Mineralogía secundaria
Halita, (NaCl)/ Silvita, (KCl)	Silvita, (KCl)/ Halita, (NaCl)
Dolomita, (CaMg (CO ₃) ₂)	Calcita, Ca (CO ₃)
Anhidrita, (CaSO ₄)	Anhidrita, (CaSO ₄)· 2H ₂ O
Plagioclasas, (Na _{0.55} ,Ca _{0.45}) Al Si ₃ O ₈	Calcita, Ca (CO ₃) Prehnita, Ca ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂ Caolinita, Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Feldespatos potásicos, (K _{0.97} ,Na _{0.03}) Al Si ₃ O ₈ Microclina, KAlSi ₃ O ₈	Caolinita, Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ / Illita, K _{0.6} Na _{0.05} Fe _{0.05} Mg _{0.1} Al _{2.3} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂
Albita, Na AlSi ₃ O ₈	
Biotitas, KMgFe _{1.2} Si _{2.8} Al _{1.3} O ₁₀ (OH) ₂	Cloritas, Mg _{4.9} Fe _{0.1} Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈ / Crisotilo, Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ Talco, (Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)
Hornblenda, Ca _{1.8} Mg _{2.46} Fe _{2.16} Al _{0.9} Si ₇ O ₂₂ (OH) ₂	Cloritas, Mg _{4.9} Fe _{0.1} Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈ / Crisotilo, Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ Talco, (Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)

Tabla 3.99. Minerales primarios y secundarios susceptibles de reaccionar con el agua de recarga.

Los minerales indicados en la Tabla 3.99, junto con sus correspondientes estequiometrías, han sido incluidos en el código NETPATH (*Plummer et al, 1991*) para estimar qué modelos de transferencia de masas son más probables de ocurrencia en la Cubeta de Santiuste.

La comparación entre la composición hidroquímica de las aguas producto y la mineralogía del acuífero con la cual han interaccionado dichas aguas, ha permitido reproducir el conjunto de reacciones químicas capaces de explicar de forma coherente, desde el punto de vista cinético y termodinámico, los procesos operativos en el circuito de recarga artificial.

Los resultados de los modelos desde el punto de vista termodinámico y petrológico presentan una precipitación de caolinita como fase producto, implicando procesos de reequilibrio continuo respecto a este mineral. Los dos tipos de modelos

obtenidos mediante la modelización de balance de masas para este sistema (tras pasar por varios problemas de no convergencia del modelo), se exponen a continuación:

Modelo I:

0,5 plagioclasa (An_{45}) + 0,06 feldespato potásico + 1,6 Ex Na/Ca + 0,00095 biotita \Rightarrow 0,27 caolinita + 0,01 illita + 1,81 calcita,

0,5 plagioclasa (An_{45}) + 0,06 feldespato potásico + 1,6 Ex Na/Ca + 0,001 biotita \Rightarrow 0,28 caolinita + 0,0007 clorita + 1,81 calcita,

0,5 plagioclasa (An_{45}) + 0,06 feldespato potásico + 1,6 Ex Na/Ca + 0,00095 biotita \Rightarrow 0,28 caolinita + 0,001 crisotilo + 1,81 calcita,

Modelo II:

6,3 plagioclasa (An_{45}) + 0,06 feldespato potásico + 0,00095 biotita \Rightarrow 3,2 caolinita + 0,013 illita + 2,83 calcita + 11,6 SiO_2

6,3 plagioclasa (An_{45}) + 0,06 feldespato potásico + 0,001 biotita \Rightarrow 3,2 caolinita + 0,0007 clorita + 2,83 calcita + 11,6 SiO_2

6,3 plagioclasa (An_{45}) + 0,06 feldespato potásico + 0,00095 biotita \Rightarrow 3,2 caolinita + 0,0011 crisotilo + 2,83 calcita + 11,6 SiO_2

Algunas de las observaciones deducidas son las siguientes:

– La concentración en Ca^{2+} , K^+ y SiO_2 que muestran las aguas, dada la mineralogía de las arenas eólicas, procedería de la alteración de plagioclasas, feldespatos y cuarzo respectivamente. La eliminación de parte de estos iones de la disolución se produciría como consecuencia de la neoformación de filosilicatos tipo clorita.

– Respecto al posible Fe_{total} y al Mg^{2+} que pueda liberar el acuífero como resultado de los procesos de alteración, cabe decir que la mayor parte del Fe_{total} procede de la alteración de fases ferruginosas. Una parte del mismo es retenido como consecuencia de los procesos de formación de filosilicatos, mientras que la totalidad del Mg^{2+} podría ser retenido como resultado de la precipitación de algún tipo de silicato magnesiano, junto con la dolomita disuelta en las aguas subterráneas.

– Existe un enriquecimiento anómalo de Na^+ en las aguas respecto a la pauta seguida por la roca, especialmente en las zonas donde el acuífero presenta mayor espesor. Destaca, por otra parte, que las elevadas concentraciones de SiO_2 en las arenas eólicas roca no están reflejadas en las aguas en la misma proporción. Este hecho podría ser debido a que el aporte de SiO_2 a la solución, al igual que sucedía en el resto de sistemas estudiados con anterioridad, procedería, en gran parte, de la degradación de plagioclasas, proceso en el cual se produce también una importante liberación de Na^+ .

– La justificación de la precipitación de cuarzo como tampón de la sílice, con relativa ausencia de procesos de intercambio iónico, implica una disminución de los moles de caolinita precipitada respecto a los considerados en el caso anterior.

– La presencia de facies bicarbonatadas sódicas en sondeos profundos aparentemente pueden resultar de dos mecanismos, bien sea por intercambio catiónico o bien por hidrólisis de silicatos. Considerando la baja capacidad de intercambio catiónico en la roca base, la disolución de albita y minerales secundarios (incluyendo caolinita y calcita), se puede pensar en que la hidrólisis de silicatos es un factor con mayor peso del previsto en la generación de agua bicarbonatada sódica. De acuerdo con los trabajos de *Toran & Saunders, 1999*, la hidrólisis de silicatos resultaba el mecanismo de mayor peso en este proceso en experiencias realizadas en Tennessee (USA) en materiales pizarrosos con illita, cuarzo, clorita y piritita con albita y dolomita.

– La concentración de K^+ en la roca se mantiene en el mismo rango que la de Na^+ ; sin embargo, la concentración de K^+ en las aguas aumenta hasta siete veces con respecto al Na^+ . Este hecho no implicaría, necesariamente, una menor disolución de feldespato sódico respecto a potásico y plagioclasa, sino que, también, podría ser debido a una retención del K^+ en las redes de illitas neoformadas como consecuencia de los procesos de degradación de los feldespatos potásicos primarios. La alteración de feldespatos potásicos, en mayor o menor medida, contribuye además a la puesta en disolución de SiO_2 .

– En cuanto a la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , las pautas observadas indican un enriquecimiento de Ca^{2+} y empobrecimiento en Mg^{2+} en el sistema, salvo casos puntuales supeditados a la cercanía de minerales salinos tan abundantes en el sector oeste de la *Cubeta*.

– Parece ser relevante el desarrollo de procesos de intercambio iónico Na/Ca que justificaría la existencia en las aguas de cantidades muy elevadas de Na^+ y valores reducidos de SiO_2 en relación con las presentes en la roca. El intercambio iónico Na/Ca tendría lugar entre iones Ca^{2+} disueltos en las aguas, e iones Na^+ presentes en las sales y en los productos de alteración de las fases minerales del acuífero.

Los códigos empleados permiten además realizar ciertas aproximaciones a los procesos químicos de biodegradación cinética y el estado de las reacciones Redox (*Parkhurst, 1995; Griffioen et al, 1998*).

Uno de los inconvenientes hallados, inherentes a los modelos de balances de masas en general, es su escasa variabilidad durante la trayectoria de las aguas, lo que limita ciertos procesos con probabilidad de ocurrencia muy baja. Al mismo tiempo parecen inapropiados para reflejar las reacciones más frecuentes en cada lugar y período del acuífero, la transición climática y la fisiográfica del ambiente.

La presencia de materia orgánica en el sistema (CH_2O) estará vinculada además a la actividad de las trazas de metales pesados, no analizados pero detectados en el acuífero. Esta interacción tiene en cuenta la mayoría de los complejos inorgánicos acuosos, especialmente Ca, Fe, Mg y Al y su complejación con ácidos orgánicos disueltos. Los sorbentes serán los minerales de la arcilla, materia orgánica y óxidos-hidróxidos de hierro, en condiciones térmicas similares (*Griffioen et al, 1998*).

En este contexto se dispone de información suficiente para determinar que reacciones hidroquímicas tienen mayor probabilidad de ocurrencia en el sistema:

- **Reacciones de disolución-precipitación dependientes del pH del medio**

- $H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons CO_2 + H_2O$
- $CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2 HCO_3^-$
- $SiO_2 + 2H_2O \rightarrow H_4SiO_4$
- $Fe_{1-x}Mn_xCO_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons 1-x Fe^{2+} + x Mn^{2+} + 2 HCO_3^-$
- $Fe(OH)_3 + x H_4SiO_4 + H_2O \rightleftharpoons Si_xFe(OH)_{3+4x} \cdot H_2O$

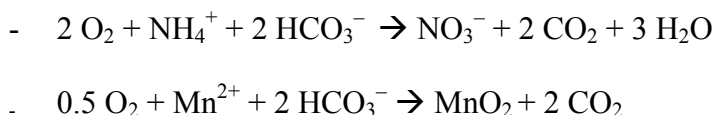
- **Reacciones Redox con metales y material orgánica**

- $O_2 + CH_2O \rightarrow CO_2 + H_2O$
- $NO_3^- + 1,25 CH_2O \rightarrow 0,5 N_2 + 0,25 CO_2 + HCO_3^- + 0,75 H_2O$
- $NO_3^- + 0,5 CH_2O \rightarrow NO_2 + 0,5 CO_2 + 0,5 H_2O$
- $3,75 O_2 + FeS_2 + 4 HCO_3^- \rightarrow Fe(OH)_3 + 2 SO_4^{2-} + 4 CO_2 + 0,5 H_2O$
- $3,5 O_2 + FeS_2 + 2 HCO_3^- \rightarrow Fe^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 2 CO_2 + H_2O$
- $2,8 NO_3^- + FeS_2 + 0,8 H^+ \rightarrow Fe^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 1,5 N_2 + CO_2$
- $3 NO_3^- + FeS_2 + HCO_3^- + H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2 SO_4^{2-} + 1,5 N_2 + CO_2$
- $Fe(OH)_3 + 0,25 CH_2O + 1,75 CO_2 \rightarrow Fe^{2+} + 2 HCO_3^- + 0,75 H_2O$
- $O_2 + 4 FeCO_3 + 6 H_2O \rightarrow 4 Fe(OH)_3 + 4 CO_2$
- $NO_3^- + 5 FeCO_3 + 8 H_2O \rightarrow 5 Fe(OH)_3 + \frac{1}{2} N_2 + HCO_3^- + 4 CO_2$
- $MnO_2 + 0,5 CH_2O + 1,5 CO_2 + 0,5 H_2O \rightarrow Mn^{2+} + 2 HCO_3^-$

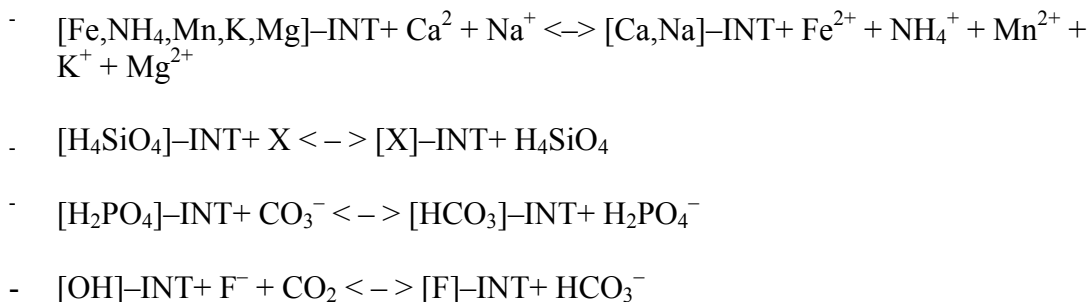
- **Reacciones posteriores a los procesos de mezcla**

- $O_2 + 4 Fe^{2+} + 8 HCO_3^- + 2 H_2O \rightarrow 4 Fe(OH)_3 + 8 CO_2$
- $0,2 NO_3^- + Fe^{2+} + 1,8 HCO_3^- + 0,6 H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 0,1 N_2 + 1,8 CO_2$
- $NO_2^- + 3 Fe^{2+} + 5 HCO_3^- + 2 H_2O \rightarrow 0,5 N_2 + 3 Fe(OH)_3 + 5 CO_2$





• – **Reacciones de intercambio**



Donde:

- CaCO_3 = calcita
- CH_2O = materia orgánica
- INT = reacción de intercambio
- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ = hidróxido férrico
- FeCO_3 = siderita
- FeS_2 = pirita
- H_4SiO_4 = especies silicatadas dominantes disueltas en el agua.

Una vez conocidas se puede llevar a cabo una atribución distribuida en los perfiles hidroquímicos específicamente seleccionados.

7.3. DETERMINACIÓN DE AMBIENTES HIDROGEOQUÍMICOS

Los ambientes han sido determinados a tenor de los datos de campo, las reacciones químicas deducidas aplicando distintos métodos y la evolución de la concentración de determinados iones, tales como nitratos, sulfatos y arsénico con la profundidad de las aguas subterráneas bajo el nivel freático, de acuerdo con los trabajos de *Van Beck et al, 1989* y *Böhlke, 2002*, y su constatación en campo en las captaciones con muestreos a más de una profundidad.

De los 14 perfiles hidroquímicos elaborados, se han seleccionado cuatro, los números 1, 7, 11 y 15, cuya posición fue presentada en la Fig. 3.58. Los perfiles seleccionados se presentan más adelante como Figs. 3.93 a 3.96 respectivamente.

Una vez caracterizadas las aguas del acuífero y conocidos los principales procesos que ocurren en cada sector, se han diseñado una serie de ambientes, cuyas características deben ser tenidas en cuenta antes de llevar a cabo operaciones de recarga artificial (AR).

Los principales procesos y mecanismos involucrados en la evolución hidroquímica en la zona vadosa son, entre otros:



- Lluvia ligera.
- Evapotranspiración.
- Escorrentía (en general las concentraciones de los solutos son consistentes con la ciclicidad del ciclo hidrológico y el número de secuencias precipitación, escorrentía, EVT e infiltración).
- Exolución del carbono orgánico.
- Infiltración en superficie, desde zanjas, pozos y depresiones.
- Entradas a sondeos por la columna de entubación.
- Acuíferos colgados.
- Disolución de carbonato cálcico y reprecipitación.
- Intercambio catiónico.
- Alteración de los silicatos y de la sílice (incluida la orgánica, como fitolitos en hierbas (*Fisher & Mullican, 1977*) y detritos ricos en aluminosilicatos (*Wood and Petraitis, 1984*). El carbono inorgánico suele presentar subsaturación en sílice amorfo y sobresaturación en cuarzo (*Fryar, 2002*).
- Incremento de la profundidad.
- Goteo a través de niveles confinantes.
- Oxidación de la materia orgánica.
- Disolución del CO₂.

El agua de recarga puede causar alteraciones en las arcillas del acuífero y disminuir su permeabilidad (*Parkhurst, & Matthew, 2002*).

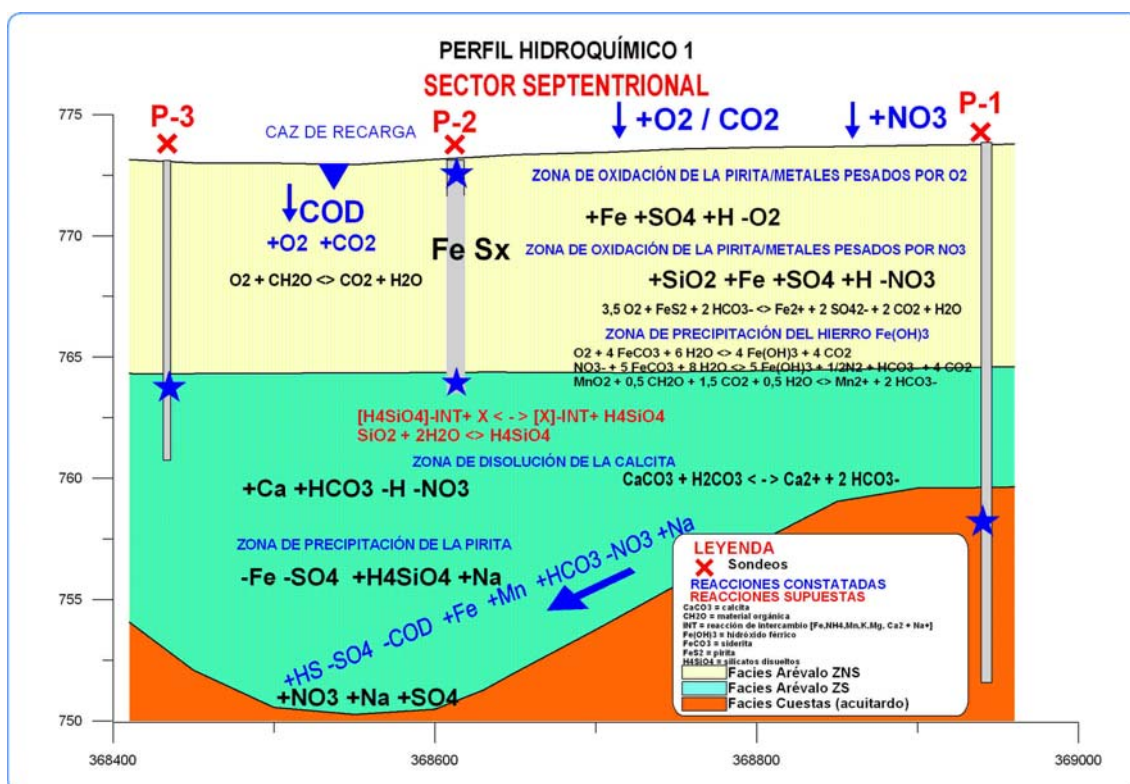
Un factor adicional a tener en cuenta en la caracterización de ambientes es la existencia de pozos de extracción, ya que pueden originar un gradiente inducido, de manera que las aguas de recarga “escapen” por dichos pozos (*Stuyfzand et al, 2002a*).

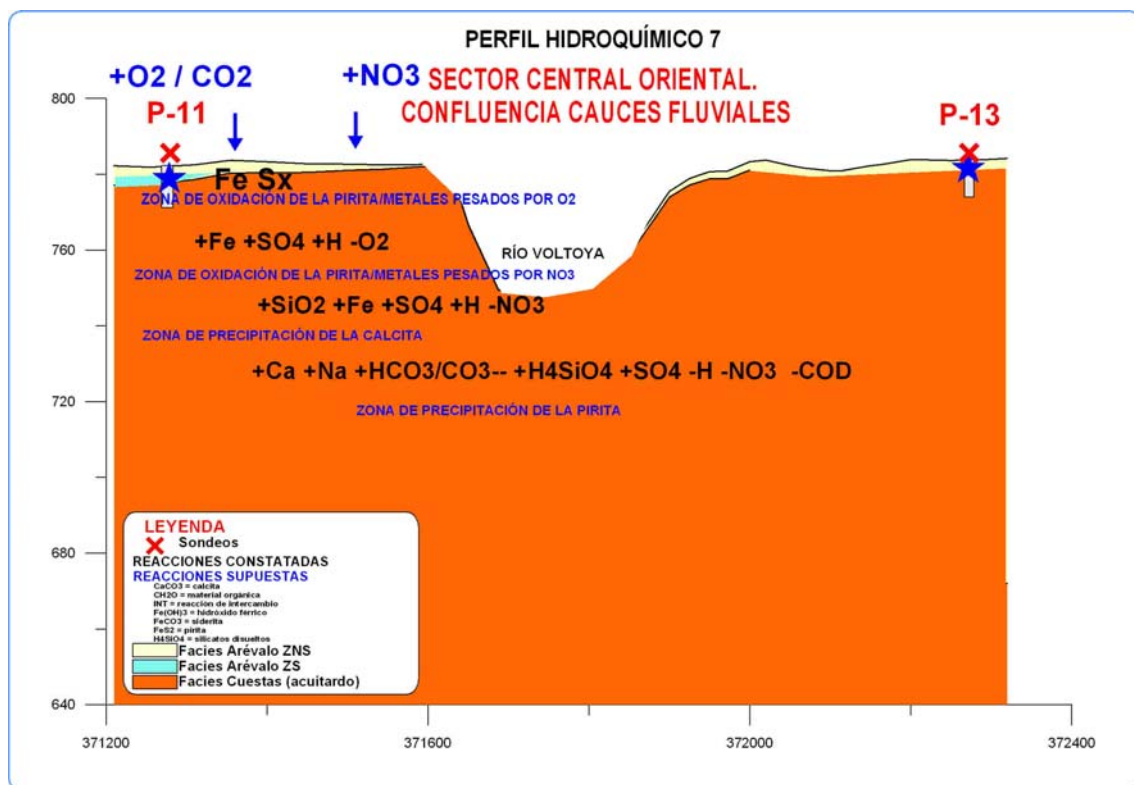
Otro condicionante es la distancia a las instalaciones de recarga o al río de toma en determinados dispositivos.

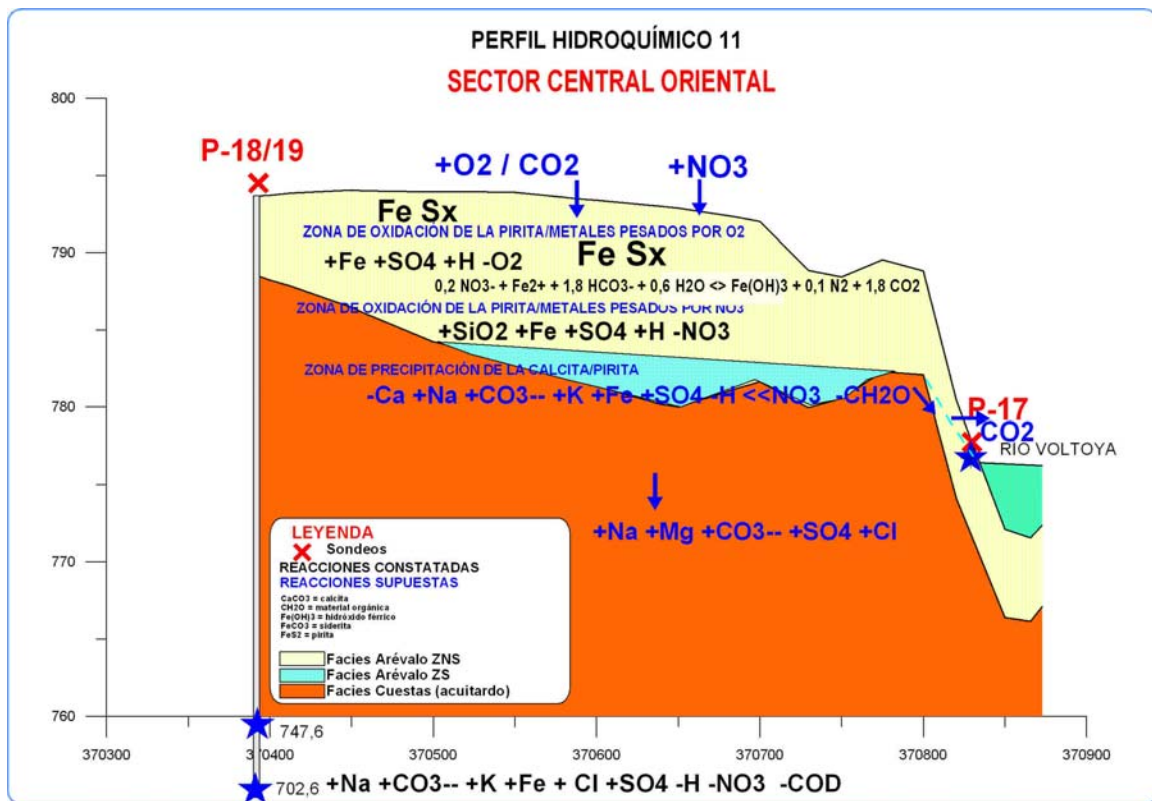
A efectos prácticos, resulta preciso evaluar qué proporciones de mezcla de las aguas pueden generar una cantidad de precipitados suficientes para que constituyan un riesgo o un impacto significativo en el acuífero (*Pyne, 2002*). En las muestras analizadas se aprecia una mayor capacidad para precipitar calcita en los sectores adyacentes a la cabecera del caz de recarga y en la zona del Sanchón. Estos sectores presentan procesos de mezclas de aguas a distintas temperaturas, por lo que la precipitación de carbonatos puede estar influida en gran medida por el contraste térmico entre las aguas de recarga y las del acuífero, especialmente en vista de que en la zona del Sanchón hay varios puntos de agua con el nivel freático por encima de la “profundidad de alerta”, es decir, de los dos metros de profundidad.

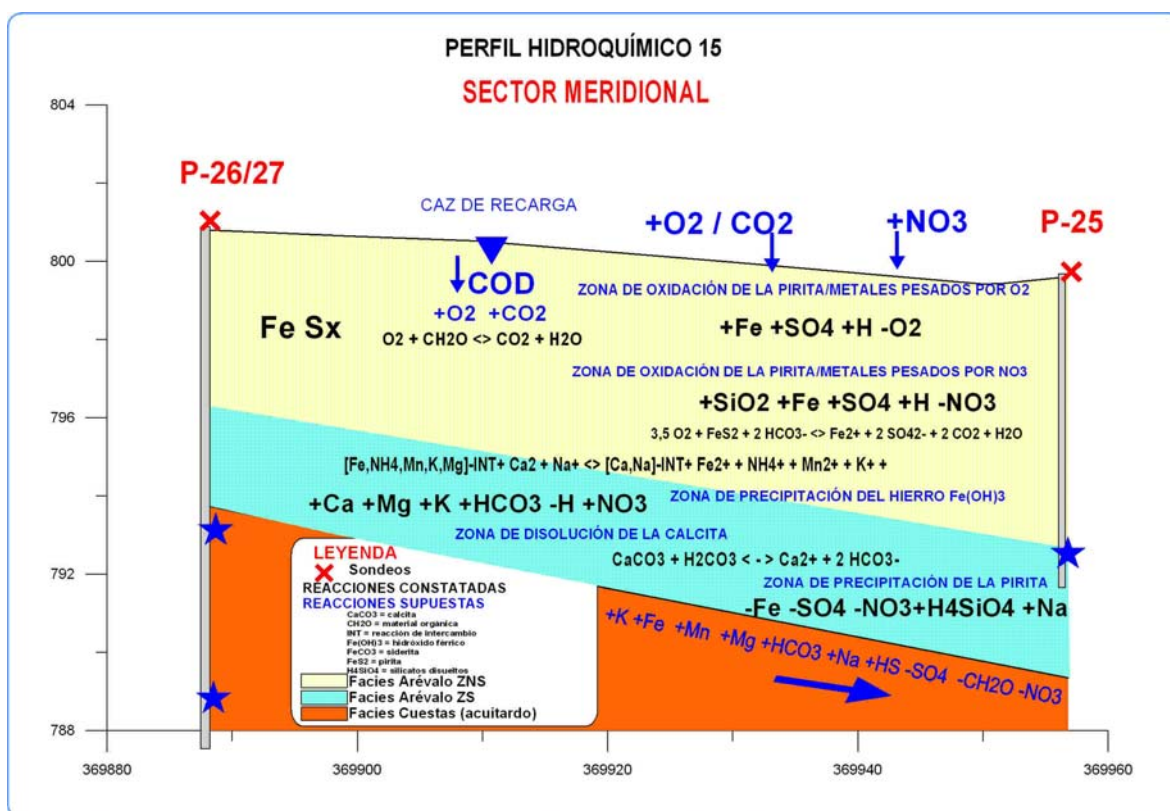
Figs. 3.67 a) a d). Principales procesos y reacciones constatados y supuestos que afectan a la hidroquímica de las aguas en el sector septentrional de la Cubeta de Santiuste (Perfiles hidroquímicos 1, 7, 11 y 15 respectivamente).











7.4. EVOLUCIÓN PREVISIBLE DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS TRAS LAS OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL (AR)

En este apartado se sintetiza la evolución hidroquímica prevista de los distintos componentes, macro y microconstituyentes presentes en el acuífero, tras su interacción con las aguas de recarga en sucesivos ciclos.

Dada la importancia de los resultados, en la sección han sido entremezcladas las citas bibliográficas con las previsiones generales basadas en los resultados de los apartados precedentes. También se ha estudiado qué reacciones de las encontradas en la bibliografía se constatan en la *Cubeta* antes, durante y después del primer ciclo de AR.

Para su tratamiento detallado, los constituyentes han sido desglosados e individualizados, a pesar de la posibilidad de creación de complejos, sinergismos, etc.

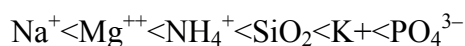
El tratamiento debe ser desarrollado de acuerdo con la zonificación del acuífero, diferenciando reacciones típicas del acuífero superficial, del profundo y de ambos.

– Pautas evolutivas previsibles en el acuífero superficial

Basándonos parcialmente, y ampliando los trabajos de Stuyfzand (*en Stuyfzand, 1998*), los cambios cualitativos que se ha constatado que experimentan las aguas de recarga tras interaccionar con el acuífero pueden ser definidos en siete etapas:

- 1) Desplazamiento de las aguas nativas por las aguas de recarga y mezcla de ambos fluidos por dispersión, con precipitación de hidróxidos de hierro y manganeso y nitrificación. Estas reacciones consumen gran parte del oxígeno disuelto en el agua de recarga. Por tanto, es previsible que en esta etapa no se generen procesos colmatantes.
- 2) Predominio de reacciones de intercambio catiónico y de sorción entre el agua de recarga y la matriz del acuífero. De este modo, los iones Ca^{++} y Na^{+} expelen parte de los cationes retenidos por adsorción de K, Mg, NH_4 , Fe^{++} y Mn^{++} y del anión F^{-} , desorbiendo SiO_2 y PO_4^{3-} .

La evolución más normal de la serie, a medida que aumenta el tiempo de residencia, es:



El origen del sodio, potasio y magnesio parece ser atribuible, en gran medida, a procesos de hidrólisis de minerales silicatados inertes presentes en el agua de recarga, como es el caso del agua del río Voltoya. Su presencia tiende a disminuir con el tiempo. Algunos autores cifran este intervalo en períodos de 100 a 500 días (*Stuyfzand, 1998*).

Durante la filtración, los **nitratos** y el **oxígeno** disuelto tienden a disminuir con relativa rapidez.



El **amonio** y los **fosfatos** PO_4^{3-} son generados por varios mecanismos, como la desorción, oxidación de la materia orgánica natural y cesión desde formas de calcita asociada a fosfatos (*Fryar, 2002*). El amonio puede ser más tarde nitrificado por oxígeno, y los fosfatos se asocian por sorción a los hidróxidos de hierro (*Stuyfzand, 1998*).

El **sílice** adsorbido genera cuarzo amorfo, o bien se incorpora a la disolución según el grado de saturación de sílice en el fluido.

El hierro y el manganeso aumentan en la solución por disolución de siderita, pirita y marcasita, desorción y reacciones Redox.

El contenido en **manganeso** en las aguas aumenta hasta una distancia cercana a 150 m desde el río por procesos de reducción de hidróxidos mangánicos (*Massmann et al, 2002*). Según las observaciones realizadas en el área de estudio en el sector de confluencia de los ríos Eresma y Voltoya, el hierro comienza a precipitar a una distancia ligeramente superior a 150-200 m. El consumo de ácido inherente a los procesos reductivos provocan un incremento de la concentración en bicarbonato y un ascenso del pH. La concentración de Fe y Mn quedará condicionada a la presencia de fuentes de estos iones en los sedimentos.

La presencia de población bacteriana, que cataliza los procesos de oxidación, influye en el sentido de las reacciones Redox y en la precipitación de calcita.

El **carbono orgánico disuelto** se comporta de forma similar, salvo si hay fuentes de carbono importantes en los sedimentos del sistema que reemplazan al COD consumido.

3) Cuando se produce el agotamiento de oxígeno y la denitrificación de los nitratos, las reacciones Redox alcanzan su máxima importancia en el proceso. El carbono inorgánico total (CIT) y los sulfatos, generan aniones bicarbonato y CO_2 , y aumenta la concentración de calcio.

De acuerdo con los cálculos de balance de masas, se han simulado ciertos procesos de interacción por oxidación de las piritas en presencia de nitratos, generándose sulfatos. Los bicarbonatos dependen en mayor medida de la materia orgánica natural (MON), y de la concentración de calcita en disolución.

4) Al aumentar el potencial Redox aumenta la concentración en nitratos a partir de la MON, iniciándose el proceso de oxidación de la pirita. De este modo, el contenido de hierro en el fluido tiende a decrecer, y, en menor medida, de calcio, bicarbonato y manganeso.

5) A medida que decrece la pirita por oxidación y la concentración de Ca , SO_4^{2-} y HCO^- , aumenta la concentración de oxígeno en el sistema, sin apreciarse movilización del hierro y de los nitratos.

6) Cuando la pirita se ha consumido, se ralentiza el proceso de generación de sulfatos, acompañado de un aumento del pH por efecto de la calcita presente en el fluido diagénético. En esta etapa, las principales reacciones en el acuífero están dominadas por

la oxidación del amonio y del carbono orgánico disuelto (COD) presente en las aguas de recarga, así como del consumo de oxígeno y nitratos por parte de la MON relicta.

7) Posteriormente, la producción de CO₂ por reacciones de oxidación y la negativización del índice de saturación de la calcita provoca un descenso del pH y un consumo de la pirita y calcita en el sistema.

De este modo se aprecia que la oxidación de la pirita u otras fases ferruginosas de comportamiento asimilable, tipo marcasita y/o siderita, controla las reacciones de interacción en el sistema tras la recarga artificial con mayor influencia que los restantes.

Estos resultados han sido contrastados con las experiencias obtenidas en la planta de recarga artificial *Dizon*, situada al sur de Holanda (*Stuyfzand, 1998*). El agua, al infiltrarse, alcanza condiciones anóxicas, principalmente por reacciones Redox y por intercambio catiónico. En este descenso se acidifica ligeramente, si bien, el descenso de pH es compensado por el bicarbonato procedente del nuevo agua de recarga. La oxidación de la pirita es la reacción dominante, así como de la materia orgánica. En esta etapa no fue apreciada movilización de algunos metales pesados, como arsénico, cinc y cobalto.

En resumen, las reacciones dominantes son la reducción de nitratos, por la oxidación de la materia orgánica y de la pirita; así como el aumento de sulfatos a medida que aumenta el tiempo de residencia del agua en el acuífero.

Finalmente, los hidróxidos de hierro dominan los procesos oxidantes, hasta que el agua presenta incrementos en hierro, manganeso, amonio y carbono orgánico en el pozo de recuperación en una proporción de 2 a 10 veces mayor que en el agua nativa (*Stuyfzand et al, 2002b*).

En general, se aprecia que los procesos generados en la *Cubeta* coinciden en líneas generales con los observados en otras plantas de recarga artificial suficientemente estudiadas.

Una vez definidos los procesos principales que ocurren en el circuito entre el caz de recarga y los pozos de riego superficiales, cabe estudiar qué procesos son los predominantes entre el dispositivo de recarga y los sondeos profundos, es decir, la evolución hidroquímica previsible de las aguas a medida que aumenta su profundidad en el acuífero.

– Pautas evolutivas previsibles en el acuífero profundo

De acuerdo con los trabajos de *Pyne, 2002*, las facies bicarbonatadas cálcicas típicas de las condiciones oxidantes superficiales tienden a evolucionar hacia un estado clorurado sódico en condiciones reductoras. Estas condiciones son propiciadas por la oxidación de la materia orgánica, que condiciona ambientes reductores antes de 30 m de profundidad en climas áridos. Estas condiciones han sido constatadas en las paleocubetas de la zona de estudio, cuya potencia alcanza los 58 m de espesor de sedimentos, con un espesor saturado de hasta 50 m.

Este proceso evolutivo conlleva el intercambio catiónico de calcio por sodio, la oxidación de la materia orgánica, generando CO_2 y agua. El CO_2 presente en el sistema es incrementado por la actividad de microorganismos que generan CO_2 en su respiración en condiciones reductoras. Al mismo tiempo, concurren numerosos procesos diagenéticos tendentes a precipitar fases minerales estables y compatibles con la química de las aguas, entre los que cabe destacar:

- Reducción de sulfatos acompañada de precipitación de hierro.
- Aumento de la concentración en hierro y manganeso en ambiente reductor.
- El ión amonio interviene catalizando las reacciones de intercambio catiónico de sodio por calcio, que tiende a precipitar en forma de calcita.

El agua gana alcalinidad, adquiriendo una composición bicarbonatada sódica.

A pesar de que los oxi-hidróxidos de **hierro** se forman con rapidez a partir de hierro disuelto en condiciones aeróbicas neutras y alcalinas, el precipitado no coagula con la rapidez suficiente para ser filtrado, formando sustancias coloidales que pueden traspasar filtros de incluso $0,1 \mu\text{m}$ (Pyne, 2002). Este hecho puede ser considerado un impacto ambiental potencial en pozos de abastecimiento, dado que la presencia de hierro en concentraciones excesivas en las aguas obstruye las instalaciones, las bombas, las tuberías y depósitos, descolora la ropa y da un sabor peculiar al agua, aunque no es perjudicial para el organismo humano (en realidad es necesario para la salud) (UNICEF, 1999).

En consecuencia, la cinética de las reacciones de recarga produce precipitación de hierro a tasas más altas de las previstas en los diagramas de estabilidad del hierro disuelto, e incluso del manganeso, si bien este metal reacciona con mucha mayor lentitud (Figs. 3.68 y 3.69).

Al contrario que el hierro, la cinética del **manganeso** es extremadamente lenta, por tanto el manganeso disuelto constituye un indicador más adecuado de las condiciones pH-Eh imperantes en el acuífero, especialmente en condiciones ligeramente oxidantes (Pyne, 2002). Su diagrama de estabilidad pH-Eh se presenta a continuación (Fig. 3.69).

La reducción de hierro (III) a hierro (II) y de manganeso (IV) a (II) en la superficie de los granos del acuífero produce una alta elevación de la concentración en las aguas subterráneas, generando fases minerales hidratadas tipo oxihidróxidos, como son la manganita (MnOOH), que se asocia a las arcillas y limos del acuífero (Schnoebelen et al, 2003).

El problema del hierro y manganeso en el acuífero puede ser regulado ajustando el pH en las aguas de recarga, con objeto de minimizar la concentración de estos iones en las aguas recuperadas. Para ello es preciso un seguimiento exhaustivo, muestreando en distintos ambientes y a distintas profundidades, y aplicando técnicas SAT específicas.

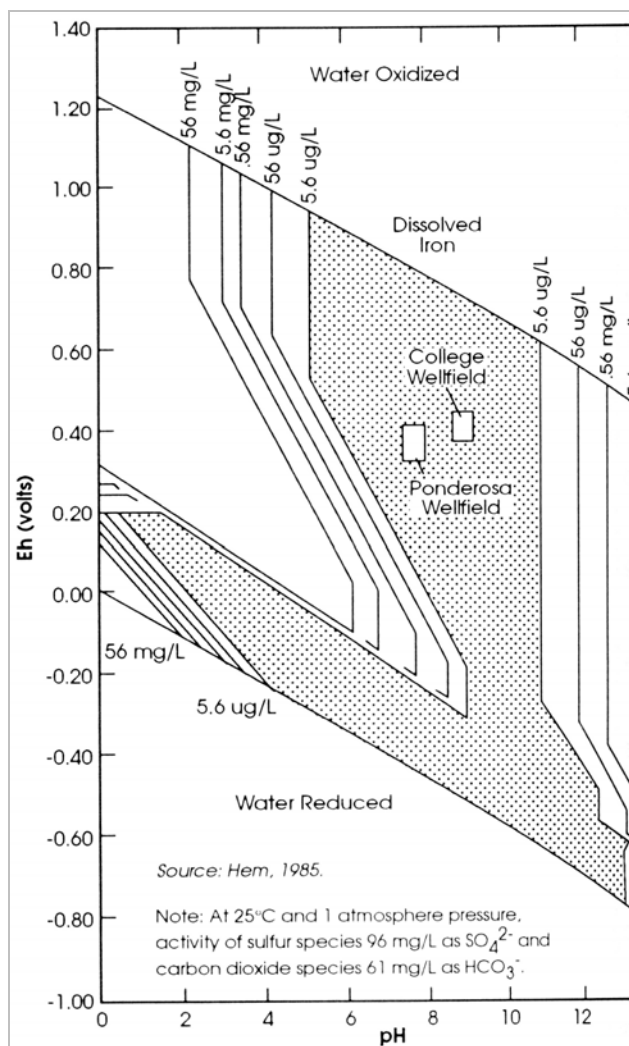


Fig. 3.68.. Diagramas de estabilidad del hierro disuelto en función de su actividad química en función del pH y Eh. Tomado de Pyne, 1995.

En la mayoría de las experiencias realizadas en USA se ha comprobado que un ligero aumento del pH hasta 8 u 8,3 ha servido para controlar la disolución de Fe y Mn (Schnoebelen et al, 2003).

Como nota procedimental, conviene destacar que, con frecuencia, los iones de hierro (II) aparecen asociados a cationes de magnesio en hidróxidos. De ahí la importancia destacada por algunos autores de generar diagramas de Scatter de Fe-Mg (Van Duijvenbode & Olsthoorn, 2002) para el estudio de su evolución en el sistema.

El ácido sulfhídrico generado en ambientes reductores es eliminado por oxidación en las instalaciones de ASR en el primer ciclo, disminuyendo la concentración en ciclos sucesivos (Pyne, 1998).

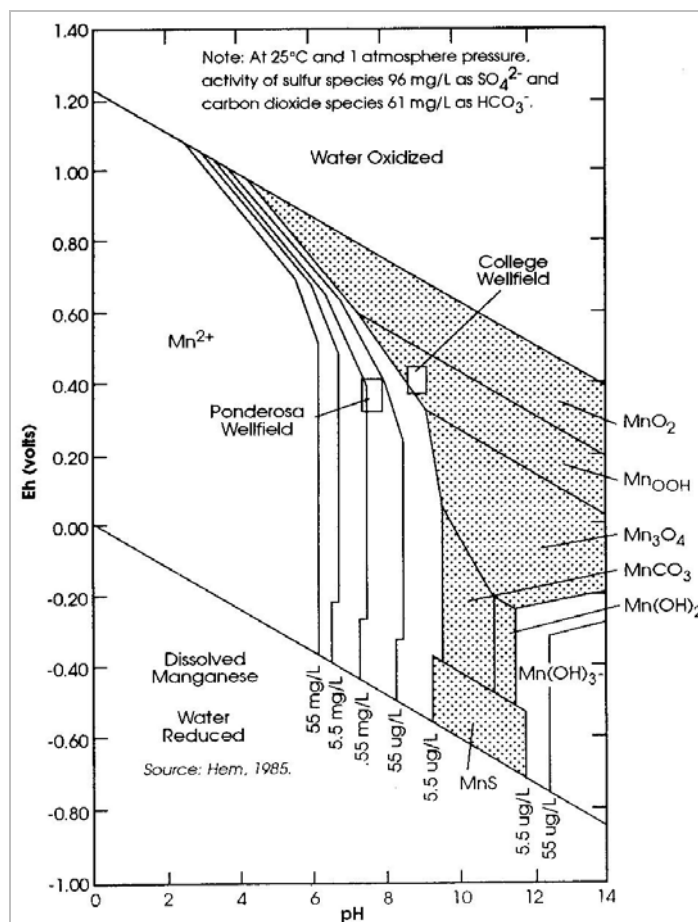


Fig. 3.69. Diagrama de estabilidad y equilibrio del manganeso en función del pH y Eh. Tomado de Pyne, 1995.

La génesis de **sulfatos** en las aguas subterráneas es muy frecuente, dado su campo de estabilidad desde un Eh de -200 mV. El siguiente diagrama muestra las condiciones de equilibrio de los sulfatos. La presencia de sulfatos disueltos modifica las condiciones de estabilidad, por generación de sulfitos y tiosulfatos, por oxidación bacteriana de microorganismos fuera del campo de estabilidad del ácido sulfhídrico (Fig. 3.70).

Los procesos de reducción de sulfatos y generación de SH_2 son favorecidos por la presencia de materia orgánica (Pavelic et al, 2002).

En cuanto a los **carbonatos**, experiencias realizadas en el banco de filtración de Atlantis, República Sudafricana, muestran que la presencia de niveles de calcreta en arenas dunares (zona de recarga), se traduce en un incremento de la concentración de iones carbonato en los sondeos de extracción (zona de recuperación). El proceso conlleva el consecuente aumento de la temperatura del agua (Tredoux & Cavé, 2002).

La estabilidad de la calcita es dependiente de la velocidad de transporte del fluido y de la introducción en la estructura de cationes “alienígenas”. Como ejemplos del segundo tipo destaca el intercambio de iones sulfato por iones carbonato en la calcita, así como las grietas en su superficie, que incrementan su solubilidad (Pyne, 1995). La presencia de hidrogeniones libres en el sistema y su reacción con carbonatos generan calcio y bicarbonatos (Ingebritsen & Sanford, 1998).

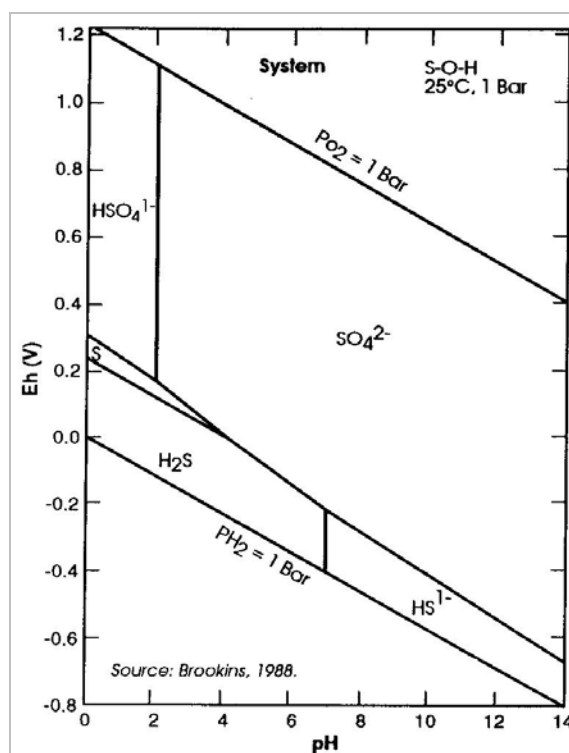


Fig. 3.70. Diagrama de estabilidad y equilibrio de las formas sulfurosas en función del pH y Eh. Tomado de Pyne, 1995.



Fig. 3.71. Niveles de carbonatos en acuífero en la margen derecha del río Voltoya. Inmediaciones del Puente Chico de Coca.

La presencia de niveles carbonatados tiene además consecuencias geomorfológicas y es determinante en el asentamiento de ciertas especies vegetales (Fig. 3.71).

En síntesis, la presencia de niveles carbonatados en el acuífero permiten intervenir en el control del pH del medio, en casos en los que predominan los procesos de oxidación de la pirita en el acuífero. Además, la presencia de calcita en el sistema y la temperatura de las aguas de recarga con respecto a las del acuífero, son parámetros que condicionan en gran medida la precipitación de encostramientos en el acuífero. Su control es viable y relativamente poco oneroso si se aplican las medidas adecuadas.

Las fases **nitrogenadas** son más impredecibles que las sulfurosas. El nitrógeno gas es la especie más estable en la mayor parte de las condiciones naturales de Eh-pH. La génesis de nitratos requiere de condiciones fuertemente oxidantes, mientras que la génesis de amonio requiere unas fuertemente reductoras. Una vez que las fases se encuentran en disolución, el equilibrio metaestable amonio-nitrato es un caso frecuente en las aguas subterráneas, como se muestra en la Fig. 3.72.

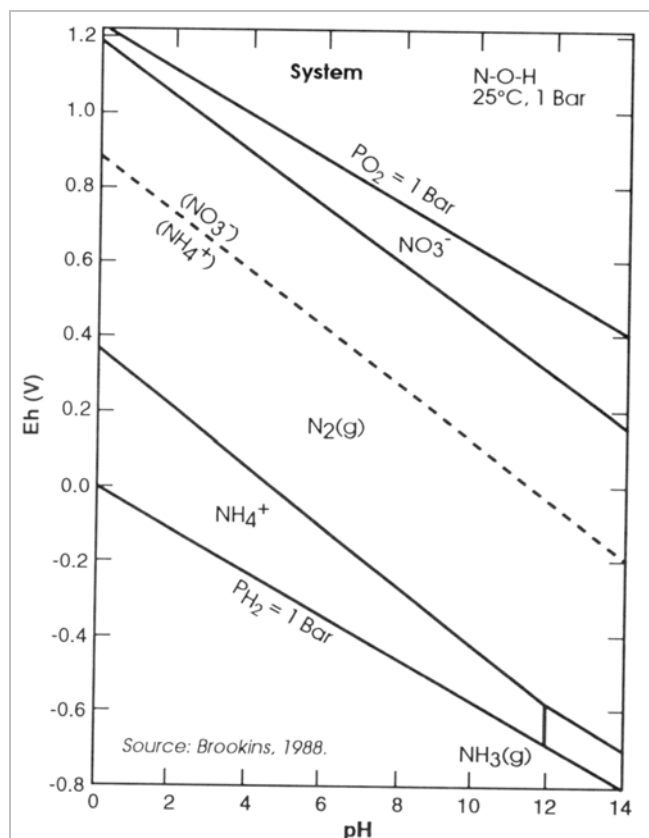


Fig. 3.72. Diagrama de estabilidad y equilibrio de las formas nitrogenadas en función del pH y Eh. (Pyne, 1995).

La presencia de nitratos en las aguas subterráneas tiende a interactuar con minerales sulfatados, en cuyo caso los procesos de interacción provocan la coexistencia de desnitrificación y oxidación de sulfitos a sulfatos. En este proceso son liberados metales pesados tipo arsénico por la oxidación de los minerales sulfurosos. Este puede reprecipitar en zonas con ambientes hidroquímicos sulfatos reductores en su trayectoria de flujo (Van Beek et al, 1989).

En condiciones oxidantes, la persistencia de **nitratos** y de ciertos pesticidas es mayor en el tiempo (*de Honge et al, 2002*). Esta observación se interpreta por la producción de procesos de denitrificación durante la infiltración, como consecuencia de la interacción de la materia orgánica de las aguas de recarga, del caz y del acuífero, así como por la presencia de minerales sulfurosos en el medio. Además, la mineralización de materia orgánica representa una fuente de amonio, independientemente de que haya una fuente de nitrógeno externa.

El N y P tienden a disminuir en ambientes salinos. La microbiota se ve alterada por la introducción en el acuífero, alcanzando un equilibrio tras un período de uno o dos años (*Vanderzalm et al, 2002*).

La máxima concentración de arsénico en las aguas subterráneas en una zona regable con aplicación de estiércol se produce entre los 17 y 25 metros. En torno a 15 metros existe un ambiente hidroquímico denitrificante de al menos dos metros de espesor en materiales detríticos similares a los de la zona de estudio (*Böhlke, 2002*). Este ambiente geoquímico coincide con la máxima concentración en sulfatos, derivada de los procesos de oxidación de los sulfitos. A una profundidad ligeramente inferior aparece la máxima concentración en arsénico (21 m), relacionada con la oxidación de minerales sulfurosos y liberación de metales pesados en disolución (*Van Beck et al, 1989*).

La concentración de **oxígeno disuelto** en las aguas de recarga y en el acuífero es determinante de la concentración de nitratos con la profundidad, así como la distribución de burbujas en el acuífero.

La disminución del oxígeno disuelto por oxidación de minerales ferrosos conlleva un incremento en la concentración de Fe y SO₄ en el sistema.

La concentración previsible de cloro, tras correr el código de modelización PHREEQC, resulta inferior en las etapas sin y postoperacionales a las concentraciones observadas en campo, lo que induce a pensar en un factor de salinización adicional.

El **total de sólidos disueltos** está directamente determinado por la salinidad de las aguas subterráneas, especialmente por su estratificación por densidad (*Pyne, 2002*).

Los procesos dominantes a medida que aumenta la dirección del flujo y la profundidad son, según *Massmann et al, 2002*:

- Respiración aeróbica con generación de CO₂ y agua.
- Procesos de denitrificación, generándose N₂, CO₂ y agua.
- Reducción del manganeso (IV), generándose manganeso (II), CO₂ y agua.
- Reducción del hierro (III), generándose hierro, CO₂ y agua.
- Reducción de sulfatos, generándose ácido sulfhídrico, CO₂ y agua.

Algunas experiencias realizadas en distintos escenarios mundiales donde han sido refrendadas o enfrentadas estas observaciones se citan a continuación.



En una experiencia puntual derivada del seguimiento de un ARF (Acuifer Recharge Facility) en Arizona, se observó que de todos los parámetros controlados sólo los nitratos y el parámetro TSD aumentaron durante los primeros dos años de operaciones. Los nitratos lo hicieron por encima de niveles del estándar de calidad, alcanzando el “nivel de alerta”, nivel que representa la concentración máxima a partir de la cual existe riesgo de impacto para las aguas subterráneas y hace cuestionarse la operatividad y validez de las instalaciones (*Legg & Sagstad, 2002*).

En una planta piloto al oeste de Holanda, cercana al río Rhin, se ha apreciado cómo la oxidación de la pirita (que había disminuido hasta un 50% en el acuífero) ha provocado un ascenso de la relación iónica Fe/O_2 , conduciendo a la formación de hidróxidos de hierro. Estos han pasado a constituir procesos incrustantes en las tuberías de los pozos de inyección. Se ha observado además que la oxidación de las piritas y de la materia orgánica ha producido un descenso del oxígeno disuelto en el acuífero y de la concentración en nitratos, lo que a su vez trae como consecuencia un aumento de la concentración de sulfatos, hierro, de la acidez (disminución del pH), de iones bicarbonato y calcio por disolución de carbonato cálcico, así como de fosfatos, manganeso, amonio y sílice por desorción (*Moorman et al, 2002*).

De acuerdo con las experiencias obtenidas en Oderbruch Polder, 50 km al noreste de Berlín, Alemania, se observa una secuencia de reacciones predominantes en la lateral desde el río Oder a los pozos de extracción. Según aumenta el tiempo de residencia de las aguas se aprecia una gradación de reacciones Redox durante al menos 3 km. El cambio de condiciones aerobias a anaerobias se produce en la franja de 4 a 5 m de profundidad. En principio predominan los procesos oxidantes. Los iones aceptores O_2 , NO_3 y SO_4 adquieren electrones del carbono orgánico disuelto (COD), que es el donante principal, descendiendo el pH hasta que la generación de sulfatos se convierte en la reacción dominante.

Según las experiencias obtenidas en el banco de filtración de Berlín, el proceso químico clave en el cake generado y en los lodos que colmatan el acuífero es la degradación microbiana de las sustancias orgánicas. La energía necesaria para la degradación es obtenida de forma progresiva de los compuestos químicos inorgánicos. Una vez consumido el oxígeno, la actividad microbiana predominante es anaerobia, generando ácidos que, a su vez, reaccionan con los carbonatos en un proceso designado “diagénesis temprana” (*Schultz, 2000*). El resultado es un agua gravífica pobre en oxígeno, sulfatos y nitratos y rica en bicarbonatos y amonio, así como la precipitación de metales pesados en condiciones anaerobias (*Fritz et al, 2002*).

De acuerdo con los usos de recarga artificial para la recuperación de humedales, las experiencias llevadas a cabo en Holanda descritas en *Stuyfzand, 2002b* permiten deducir una serie de procesos dominantes, ejemplificados en la Fig. 3.73.

Como rasgos comunes a todas las experiencias descritas, cabe mencionar las siguientes:

En principio, la calidad del agua está controlada por la disolución de carbonatos, silicatos y sales del suelo. A mayores profundidades por el intercambio catiónico de Ca y Mg por Na adsorbido. La presencia de yeso en algunos sectores del acuífero conlleva la evolución de facies bicarbonatadas sódicas a sulfatadas sódicas.

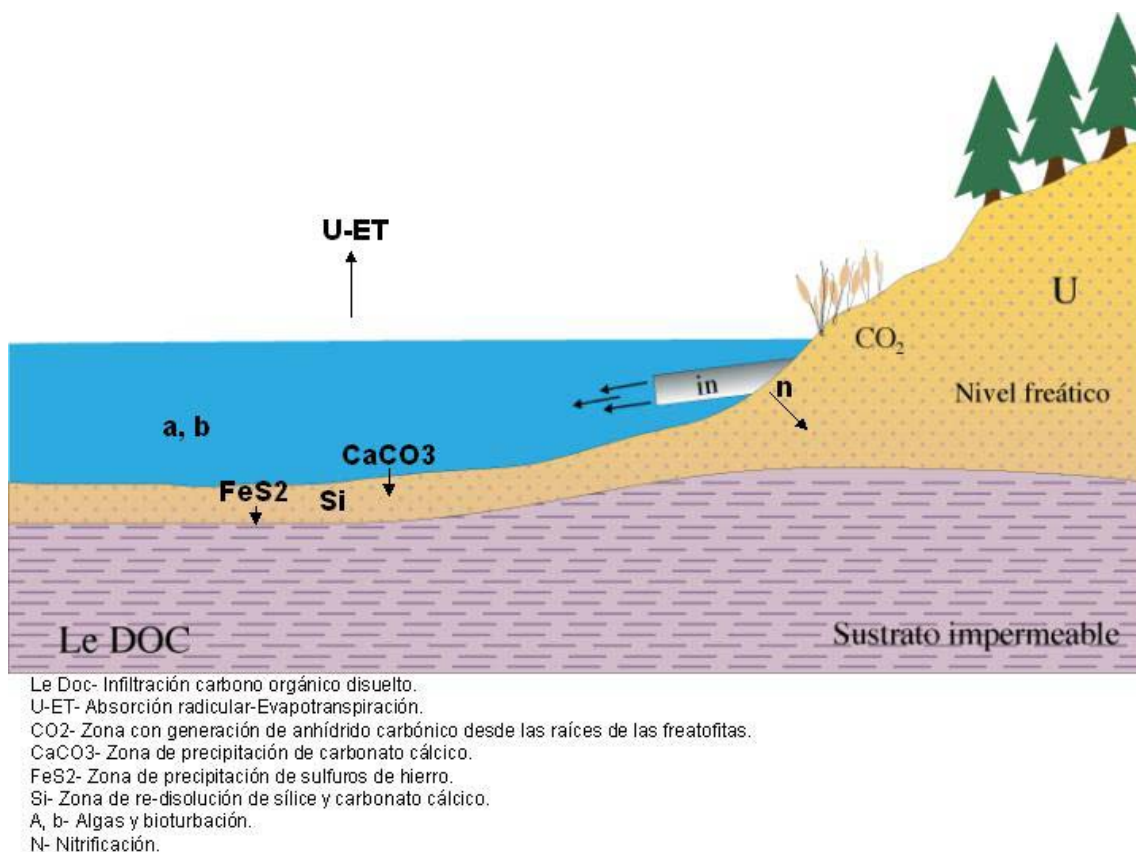


Fig. 3.73. Principales procesos que afectan a la hidroquímica del agua en experiencias de recarga artificial en humedales degradados. Modificado de Stuyfzand, 2002b.

Como consecuencia, se aprecia que en este tipo de acuíferos detríticos, los perfiles hidroquímicos entre el caz de recarga o río y los pozos de extracción presentan una tendencia evolutiva donde predominan los siguientes iones disueltos en el medio a medida que aumenta la distancia: en principio, el medio presenta gran cantidad de oxígeno disuelto, que arrastra nitratos de la ZNS y, a medida que prospera el flujo, son reemplazados por sulfatos presentes en sobresaturación en las aguas subterráneas en un proceso de envejecimiento hidroquímico normal. El máximo de sulfatos se produce a partir de 2 km aproximadamente, tanto en pozos someros como en profundos (Massmann et al, 2002).



Los procesos ocurridos durante la recarga regulan la composición del agua en el acuífero libre superficial.

La evolución natural del agua subterránea está determinada principalmente por los iones sodio y cloruro. Este último constituye además un trazador conservativo (Vanderzalm et al, 2002).

Esta línea de investigación queda abierta y con constante atención sobre las Mejoras Técnicas Disponibles (MTD) que puedan surgir en el futuro próximo.

8. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEDUCIDAS DE LA HIDROGEOQUÍMICA

Entre las aportaciones al conocimiento hidrogeológico derivadas de las caracterizaciones del acuífero y de técnicas adicionales, cabe destacar:

En la mayor parte del acuífero predominan las aguas bicarbonatadas cálcicas, encontrándose muchas de ellas sobresaturadas en dolomita. No obstante, hay algunas zonas puntuales donde predominan facies cloruradas y bicarbonatadas sódicas, asociadas a focos de contaminación o a flujos profundos. Este hecho se ajusta a la premisa siguiente: “el agua extraída en cada sondeo representa una mezcla perfecta del agua almacenada en todos los estratos permeables atravesados por el mismo.”

La distribución de los diferentes parámetros e índices químicos muestra una gran irregularidad en su conjunto, no obstante se aprecian tendencias de cambio desde las zonas más salinizadas (entorno de Ciruelos de Coca –donde hay fases evaporíticas– y trazado de la cacera de Santiuste) centrífugamente.

El acuífero eólico superficial presenta en su conjunto un comportamiento libre, aunque parece haber niveles confinantes locales.

Las mayores concentraciones iónicas se disponen de acuerdo con el trazado del eje de la Cubeta de Santiuste. El gradiente hidráulico es hacia el noreste y los ríos Voltoya y Eresma tienen un carácter ganador, aunque la distribución de los parámetros químicos indica que ésta descarga es bastante escasa.

Las facies hidroquímicas de los sondeos intermedios confirman el carácter lenticular de las formaciones permeables (arenas y gravillas) intercaladas en el paquete arcillo-margoso. La distribución de los lentejones arenosos presenta cierta aleatoriedad, como corresponde a una sedimentación de carácter fluvial, y la permeabilidad de la matriz que engloba a dichos lentejones debe ser muy baja.

La baja permeabilidad de la matriz arcillo-limosa que conecta entre sí a los lentejones permeables conlleva que el flujo regional sea muy lento.

Con los datos obtenidos en los sondeos parece que el comportamiento regional del acuífero se ajusta a un modelo conceptual de *Tóth*, diferenciando aguas de circulación regional, evolucionadas, calientes y profundas; aguas de flujo intermedio y aguas someras, jóvenes y poco evolucionadas.

Las elevadas concentraciones de ión nitrato, que llegan a 284 mg/l, indican que las aguas no son aptas para su uso como aguas potables. Estas concentraciones están relacionadas con el uso de abonos minerales y con el reciclado de las aguas usadas para riego, la cual se ve favorecida por la alta permeabilidad de los estratos de Los Arenales.

En cuanto al funcionamiento de los cauces fluviales a partir de la posición relativa de las isocoras con los cursos de agua de drenaje y con el caz de recarga artificial, de las cartografías de isorrelaciones y de los perfiles hidrogeológicos e

hidrogeoquímicos realizados, indican que los ríos tienen carácter ganador o conservativo, salvo en su extremo meridional. Las cartografías de isocontenidos y los perfiles mencionados presentan isolíneas generalmente oblicuas al trazado de los cauces fluviales. Esta posición representa un indicio de que el río funciona de forma insolidaria con el acuífero en cuanto al quimismo de sus aguas se refiere.

El curso alto del río Voltoya a su entrada en la *Cubeta* parece tener un carácter influente, al aparecer isolíneas paralelas al cauce principal. Aparentemente este paralelismo es proporcionales al caudal de infiltración. En estos casos, la mezcla de aguas del río y del acuífero presentan un gradiente de variación entre las aguas superficiales y las aguas indígenas.

El mismo caso se detecta en las inmediaciones del Arroyo de la Ermita en las cartografías realizadas durante las operaciones de recarga artificial. En el sector sur, donde hay un tramo con superficie de infiltración inefectiva, las isolíneas (por ejemplo para isoconductividad de las aguas subterráneas) son oblicuas por lo general; mientras que en la mitad norte, donde se ha manifestado una mayor efectividad de recarga, las isocoras presentan un paralelismo más alto.

A tenor de las observaciones realizadas en los mapas de isocontenidos, isorrelaciones y perfiles, cabe destacar algunas especificaciones:

La zona de estudio se encuentra en la cabecera de la cuenca del Eresma, correspondiendo por tanto a una zona de recarga, sin descartar por ello descargas de diversa índole motivadas por condicionantes topográficos o por la relación río-acuífero. Según este esquema, los cauces de los ríos quedan por encima de los niveles de base regionales.

Por lo general el río va encajado en facies Cuestas, es decir, sobre el sustrato margoso terciario, que presenta mayor resistencia a la erosión que las arenas eólicas de la Fm Arévalo.

En general el nivel piezométrico está por encima de la cota del cauce del río, por lo que, si la permeabilidad del medio lo permite, el río tiene carácter ganador o bien conservativo. Tan sólo se han detectado puntos muy locales en que es influente (extremo sur de la *Cubeta* e inmediaciones de los manantiales situados al norte de Coca y este de Villeguillo). Estos sectores presentan un carácter influente más destacado en situaciones de avenida máxima.

9. CONCLUSIONES DEL BLOQUE 3

• Aportaciones al conocimiento hidrogeológico del acuífero deducidas del tratamiento de datos de hidroquímica

Entre las aportaciones al conocimiento hidrogeológico derivadas de la caracterización del entorno preoperacional y de la aplicación de técnicas hidroquímicas, cabe destacar:

- La constatación de la transferencia de agua entre los distintos niveles por acuíferos colgados y reciclaje de aguas. El bombeo de aguas de sondeos profundos de alta alcalinidad, conductividad y salinidad se infiltran posteriormente en el acuífero superficial en forma de retornos de riegos, interaccionando con los iones típicos de las arenas eólicas. Como resultado aparecen concentraciones elevadas de iones alcalinos, nitratos y sodio en depresiones o cubetas presentes en el paleorrelieve, como ocurre al norte de Santiuste o Noroeste de Villeguillo.
- En el medio existen abundantes lagunas salinas. Las que afloran en superficie (lagunas o bodones) se encuentran desecadas con frecuencia, si bien constituyen enclaves de alto valor ecológico. Entre tanto, existen lagunas fosilizadas que constituyen una rica fuente de iones salinos con presencia de fases específicas, como minerales de la arcilla sódicos (trona, nahcolita). Las aguas subterráneas disuelven o movilizan estos iones en su flujo regional, manifestando indicios de salinidad elevados por intrusión salina continental. Este hecho es manifiesto en las inmediaciones de Ciruelos y Villagonzalo de Coca y al norte de Villeguillo.
- Se han detectado aguas en sondeos profundos a las que se atribuye largos tiempos de residencia y que se ajustan a un modelo conceptual de tipo Tóth.

Algunos ejemplos de estas aportaciones deducidas por criterios hidroquímicos son el aumento de la concentración de ión sodio motivada por la circulación de agua entre los distintos estratos de un acuífero multicapa y su concentración en las zonas más deprimidas de la *Cubeta*, la detección de lagunas salinas fosilizadas con abundancia de minerales de la arcilla sódicos, zonas con alta concentración de iones alcalinos por reciclaje de aguas que se acumulan en las “cubetas” del paleorrelieve, la nitrificación por abonado de los cultivos y otros indicios de contaminación agrícola asociados a zonas con elevadas concentraciones de sodio e iones alcalinos, detección de zonas puntuales con contaminación antrópica, el carácter ganador de los cauces fluviales y el hidrodépendiente de algunos humedales asociados, etc.

Se han detectado además zonas de comportamiento anómalo atribuible a distintos motivos, en general tectónicos, como es la cabecera de la cadera de Betaya, sector asociado a un dren subsuperficial; o el enorme contraste a ambos lados de la divisoria de aguas subterráneas que coincide con la carretera de Coca a Villagonzalo, etc. También se han detectado pequeñas terrazas fluviales fosilizadas.

La distribución del ión bicarbonato es bastante irregular y supone un indicio de la contribución del río a la descarga del acuífero superficial.



La distribución del ión sulfato en el acuífero se mantiene alrededor de un valor de 50 mg/l. Las máximas concentraciones se han detectado en la zona más salinizada de las inmediaciones de Ciruelos de Coca. En todos los casos hay vinculación con el contenido en alcalinotérreos. La isolínea de 10 mg/l discurre casi paralela al río Voltoya, con ligeras inflexiones al ajustarse a los umbrales o zonas de máxima concentración de la *Cubeta*.

Los resultados de aplicar la relación iónica magnesio/calcio no son satisfactorios dada la heterogeneidad litológica de las muestras y la presencia de focos de contaminación con alta magnesificación.

La relación iónica potasio/sodio denota la presencia de aguas menos evolucionadas con subsaturación en halita en los sondeos intermedios que atraviesan al acuitardo arcilloso. La presencia de potasio de origen antrópico introduce un grado de incertidumbre a la aplicación del método.

De acuerdo con la aplicación de la relación iónica cloruro/bicarbonato, en general se aprecia un aumento de la salinidad desde la zona norte hacia el eje de la *Cubeta*, alcanzando valores máximos en las inmediaciones del vertido de aguas residuales de la citada cacería, por lo que los resultados están de nuevo enmascarados por la presencia de sustancias contaminantes.

Los hidrogramas de Stiff confirman la corrección de las familias de aguas establecidas de acuerdo con la profundidad de las captaciones y la presencia de focos contaminantes, bien sean antrópicos (abonado, aguas residuales) o naturales (lagunas salinas).

Los diagramas de Scatter permiten el estudio “*en relativo*” de la evolución de los iones macroconstituyentes con la conductividad. Los resultados indican que la mayor contribución a la salinidad del agua corresponde al anión CO_3H y la menor al ión $\text{SO}_4^{=}$, cuyo coeficiente de correlación es bajo. En cuanto a los cationes, la pendiente mayor corresponde al sodio y la menor al potasio, siendo mayor para el magnesio que para el calcio.

Los datos obtenidos y los cálculos realizados han sido varios, a destacar:

El balance iónico: De su análisis se desprende que la analítica parece apropiada. Los porcentajes mayores se encuentran en sondeos intermedios o profundos, lo que induce a pensar que más bien se trate de la presencia de iones o trazas no determinadas que de errores en la analítica.

Cálculo de los minerales disueltos: Se han calculado las fases minerales disueltas en cada muestra en mmoles/l a partir de sus índices de saturación respectivos. Las fases presentes son halita, dolomita, calcita/aragonito y anhidrita, con predominio absoluto de la dolomita.

- **Hidrogeoquímica y técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT)**



En las aguas de recarga artificial los procesos hidroquímicos más comunes son relativos a variaciones del pH y del potencial Redox, especialmente en acuíferos sensibles geoquímicamente. Estas alteraciones se manifiestan en variaciones en la capacidad de solubilidad y precipitación, con influencia directa en los procesos de colmatación, en la calidad del agua recuperada y en los tratamientos precisos antes de la recarga y después de la recuperación.

En principio, no se han detectado tendencias evolutivas ambientalmente negativas de importancia, si bien hay algunos procesos hidroquímicos controlables, que precisan correcciones de diseño del dispositivo de recarga y de su gestión. Entre estos cabe destacar la presencia de lentejones de sales fosilizados o zonas con salinización puntual por procesos de intrusión salina continental, focos contaminantes, etc.

En el primer caso no resulta conveniente recargar el sector occidental de la *Cubeta*. En el segundo, se ha apreciado un importante proceso de dilución de los principales procesos contaminantes, y un efecto beneficioso de la recarga artificial en zonas con contaminación focalizada en cuanto a macroconstituyentes se refiere.

Se ha detectado además la presencia de un sector con concentraciones en hierro muy elevadas y de carbonatos, donde se generan condiciones reductoras, que pueden ser controladas acrecentando la recarga artificial en este sector. Del mismo modo, se han localizado focos con abundantes procesos de precipitación de calcita y carbonatos de hierro y calcio, con incidencia en la tasa de infiltración, que requiere adoptar medidas SAT con carácter urgente, con objeto de evitar la formación de lentes carbonatadas y ferruginosas colmatantes de permeabilidad vertical muy baja.

Así mismo, el fuerte contraste térmico de las aguas de recarga y del acuífero provoca la precipitación de carbonatos en la cabecera de la estructura, donde hay variaciones en la temperatura de las aguas de hasta 11°C, y en la zona del Sanchón, donde el nivel freático se encuentra por encima de la profundidad de alerta a menos de dos metros de la superficie.

La presencia de procesos y vectores contaminantes de variadas tipologías (nitratos, cloruros, derivados alquílicos del arsénico –arsenitos y arsenatos, ácido monometilarsónico (MMA), ácido dimetilarsínico (DMA)–, vectores orgánicos, elementos orgánicos (fósforo, clorofila), etc., y compuestos orgánicos (algas, etc.) conlleva emplear técnicas SAT adecuadas, si bien quedan algunos elementos de comportamiento insuficientemente conocido, como es el arsénico y ciertos vectores biológicos detectados en el acuífero, que constituyen un impacto ambiental negativo y un riesgo sobre las aguas subterráneas. Con los datos obtenidos durante el primer ciclo de recarga artificial se aprecia una atenuación de ambos contaminantes, si bien no se ha estudiado la evolución a medio y largo plazo.

Las técnicas SAT permiten la realización de tratamientos simultáneos a la recarga beneficiosos para la calidad de las aguas, con efectos correctivos sobre la contaminación difusa y capacidad de minimizar el impacto ambiental generado, dentro del horizonte para conseguir el “buen estado de las aguas” prefijado en la Directiva 2.000/60/CE (año 2015).

- **Hidrogeoquímica y Sistemas de Información Geográfica (GIS)**

Los Sistemas de Información Geográfica permiten conocer la distribución de la información química, expresada mediante coberturas temáticas georreferenciadas. La sectorización debe ser diseñada atendiendo a subcuencas y divisorias de aguas superficiales y subterráneas. Su disponibilidad posibilita el tratamiento distribuido de la información hidroquímica en base al funcionamiento hidrogeológico del medio, e incluso el complemento a procedimientos hidroquímicos estocásticos de forma distribuida.

Las cartografías elaboradas y el tratamiento de las mismas mediante operaciones de álgebra de mapas (sustracción de la concentración de iones macroconstituyentes en los puntos de dos mallas similares correspondientes al mapa de isocoras) permite detectar diferencias cualitativas entre fases consecutivas de forma didáctica y clara.

- **Estudio de las pautas de reacción**

La aplicación de códigos (WATEQ4H, PHREEQC y tanteos con NETPATH con formulaciones teóricas), conjuntamente con un estudio detallado del acuífero relativo a sus datos hidroquímicos, análisis de precipitaciones, escorrentía, infiltración (fluctuaciones climáticas), concentración de solutos en la parte superior del suelo por evapotranspiración, y determinación de zonas de infiltración preferente (paleodepósitos aluviales), etc. han permitido conocer en qué zonas del acuífero ocurren reacciones preferentes, como por ejemplo infiltración en superficie, conexión de acuíferos colgado e infrayacente/s, goteos a través del acuitardo que separa el acuífero superficial del profundo, disolución y precipitación de carbonato cálcico, procesos de intercambio catiónico, hidrólisis de la sílice, oxidación de la materia orgánica, generación de ambientes reductores, etc. El problema de la mayoría de estos códigos es que no simulan el transporte advectivo.

La multiplicidad de sectores con características específicas y diferentes configura a la modelación directa como la técnica más idónea para estudiar la tendencia evolutiva en los distintos sectores. La modelización inversa permitirá en un futuro conocer las pautas evolutivas retrospectivamente. Para ello se considera conveniente su aplicación en los manantiales de las terrazas del río Voltoya, si bien un ciclo de recarga resulta un período insuficiente para aplicar esta técnica.

A la vista de la enorme problemática originada por procesos contaminantes naturales y artificiales, cabe dilucidar si la recarga resulta beneficiosa por dilución de estos contaminantes, o si su interacción con los iones acumulados en la zona no saturada puede derivar efectos medioambientales negativos, acumulativos e incluso sinérgicos. Los códigos empleados indican el efecto negativo de algunas sustancias en un intervalo de tiempo de 2-3 años, que posteriormente tenderán a decrecer.

- **Hidrogeoquímica, recarga artificial y medio ambiente**

El empleo de aguas de recarga para fines medioambientales requiere aplicar medidas de tratamiento que permitan alcanzar un estado cualitativo excelente en un



período de tiempo ligeramente superior a los cinco años, o alcanzar un agua compatible con las condiciones ecológicas de los hábitats asociados, al conferir al agua de recarga artificial (AR) una composición y unas características parecidas a las aguas primigenias de los humedales mediante técnicas de AR inducida

La determinación de los parámetros inestables de todos los humedales del sistema con lámina de agua llevada a cabo durante los veranos de 1999, 2002 y 2003 del Complejo de lagunas salinas de Coca-Olmedo, permite establecer el “punto de partida” para estudiar las variaciones cualitativas que experimentarían al ser mezcladas con las aguas de recarga artificial. De este modo es posible planificar unas alternativas de recarga apropiadas desde el punto de vista medioambiental.

La presencia de amplias áreas de pinar para producción resinera y maderera debe ser preservada de posibles efectos adversos de la recarga.

La biodiversidad ecológica detectada en los humedales es alta, y queda distribuida en la interfase entre aguas superficiales y subterráneas o *Plano de Flujo Cero* (ZFP), por tanto, está vinculada a la variabilidad de los parámetros físico-químicos de las aguas y del acuífero. Entre estos cabe destacar la porosidad en la zona hiporreica, la concentración de oxígeno disuelto, la temperatura, abundancia de materia orgánica, contenido en nutrientes, facies sedimentarias, hidrología y clima.

- **Recarga artificial y procesos contaminantes**

En cuanto a los **procesos contaminantes** existe una clara incidencia entre estos y la mayoría de las captaciones de la zona agrícola. Entre ellos cabe destacar la contaminación difusa por abonado de los cultivos y otros indicios de contaminación agrícola como ocurre al este de Santiuste y norte de Coca. A este tipo de procesos difusos hay que sumar el riesgo de sodificación de las aguas de riego por retornos, la generación de condiciones oxidantes, la sobresaturación en fases carbonatadas (especialmente dolomita), sales de sodio y cuarzo.

La relación causal directa entre la contaminación de las aguas y las anomalías locales detectadas en los mapas de isocontenidos ha permitido detectar puntualmente pozos ciegos, enterramientos de animales muertos no catalogados, granjas de ganado porcino con fugas, zonas de cultivo con un abonado excesivo, etc.

Aplicando la técnica de escenarios análogos, se han estudiado las experiencias de ensayos similares en otros países. En concreto, se ha recurrido a las experiencias en el Reino Unido de utilización de los acuíferos como almacén de efluentes residuales (*Bouwer et al, 1984; Hartman et al, 1980; Idelovitch et al, 1984; Baxter y Clark, 1984*), trabajos de los que se deduce que la recarga es un medio efectivo para eliminar sustancias nocivas.

La zona presenta además abundancia de vectores biológicos en zona no saturada que se encuentran en proceso de autodepuración, procedentes en su mayoría del vertido de aguas residuales sin depuradora. A este respecto se han realizado estudios de autodepuración específicos para zona saturada y no saturada de los principales elementos y vectores biológicos detectados. Los hongos y protozoos quedan retenidos en zona no

saturada en los poros generados para el tamaño modal de los granos de arena, pudiendo alcanzar la zona saturada los restantes microorganismos dependiendo de su tiempo de residencia. En los ensayos de permeabilidad realizados se ha estimado una permeabilidad vertical de hasta 5 m/día, por lo que numerosos microorganismos pueden alcanzar el nivel freático en dos días con un gradiente hidráulico vertical inducido o estimulado. Una zona no saturada de al menos 10 m de potencia asegura la capacidad del acuífero para depurar gran parte de los residuos detectados.

Aplicando la ley exponencial, se ha deducido una cinética de degradación (eliminación en bacterias, inactivación en virus) de 2 a 20 días para las bacterias y de 10 a 100 días para los virus en las condiciones de referencia. En la mayoría de la zona de estudio los niveles se encuentran en torno a esta profundidad, aunque cabe esperar un ascenso del nivel freático durante la recarga.

En cuanto a los elementos traza, tradicionalmente ha habido una gran “relajación”, justificada porque el origen de las aguas no es industrial por lo general, la industria existente tiene escasa capacidad contaminante y no genera microconstituyentes en abundancia. En la actualidad, los estudios de atenuación de ciertos elementos traza (metales pesados), están en auge (especialmente el arsénico). Su detección en zonas del acuífero de Los Arenales en concentraciones superiores a 100 ppb en sondeos tradicionalmente empleados para abastecimiento urbano, ha creado una auténtica “psicosis” en la población. Actualmente se están llevando a cabo estudios para estudiar su procedencia y evolución previsible, si bien se presenta el inconveniente de carecer de datos históricos que permitan conocer si ha habido algún proceso que haya desencadenado esta situación. Actualmente la Confederación Hidrográfica del Duero ha promovido estudios para conocer el estado y alcance de este problema (*Barroso et al, 2002*). La modelización de la evolución del arsénico a partir de datos facilitados por la CHD ha dado problemas de convergencia con el modelo PHREEQC, pero no con el EQ3/6 (*Tenajas, 2003, comunicación verbal*).

Las aguas de origen ganadero suelen presentar concentraciones importantes en trazas tipo cobre y zinc, que no han sido evaluadas. y es previsible que aparezca arsénico en forma de ácido (MMA y DMA) asociado a moléculas orgánicas, lo que constituye una interesante línea de investigación.

En las inmediaciones de los cauces fluviales cuyo caudal de base está vinculado a la oscilación del nivel freático se aprecia un grado de contaminación muy bajo, soportando la hipótesis de la conveniencia de la recarga artificial para la mejora de las condiciones cualitativas del acuífero.

- **Aspectos procedimentales**

Debe quedar bien establecido el protocolo de muestreo para partículas y bacterias que asegure su representatividad.

Una técnica hidroquímica adicional que aporta información importante relativa a los procesos de interacción río-acuífero se basa en la posición de isocoras o isolíneas de determinadas relaciones iónicas con respecto a los cauces fluviales.

Para estudiar la circulación regional y con el tiempo de residencia que pasan las aguas en el acuífero, se ha recurrido al empleo de índices, relaciones y diagramas hidrogeoquímicos con un *modus operandi* doble: por un lado, se ha estudiado la evolución “en absoluto”, es decir, la evolución espacial de los valores a partir de la ordenación de ciertas isorrelaciones iónicas y de mapas temáticos. Por otro lado, “en relativo”, es decir, estudiando la evolución de ciertos iones con respecto a la evolución de un parámetro específico en las muestras (en este caso se ha elegido la conductividad). De este modo, las isolíneas de concentración de sodio o ión cloruro paralelas al cauce del río denotan un carácter perdedor de éste, mientras que si son oblicuas apuntan a un tramo ganador, como ocurre en la margen izquierda del Voltoya entre Santiuste y Villeguillo. Esta técnica aporta indicios importantes para deducir el carácter de los cauces fluviales, la hidrodependencia de determinados humedales, la presencia de barreras hidrogeológicas, etc.

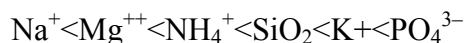
De acuerdo con los resultados obtenidos, es inviable que se produzcan condiciones de equilibrio entre la mineralogía del acuífero y el agua de recarga, al menos durante los primeros ciclos (es inviable determinar cuántos, dado el carácter “atemporal” de los códigos más empleados). De ahí la importancia del ***principio precautorio*** al iniciar experiencias de recarga artificial.

Se han diseñado y aplicado dos nuevas relaciones iónicas: Fe/O₂ y NO₃/O₂. Ambas posibilitan deducir y posicionar ambientes hidroquímicos en el acuífero y averiguar qué zonas presentan predominio de reacciones oxidantes, reductoras, etc., que requieren aplicar técnicas SAT para minimizar la contaminación, evitar la génesis de precipitados, disminuir el grado de colmatación, etc. Estas relaciones permiten, además, el seguimiento de la evolución de los ambientes hidroquímicos en el acuífero, por lo que pueden ser consideradas indicadores medioambientales de *presión*, o bien, si hay algún tipo de intervención humana en su evolución, de *respuesta*.

- **Pautas evolutivas previsibles**

- Acuífero superficial:

La evolución más normal de la serie, a medida que aumenta el tiempo de residencia, es:



El origen del sodio, potasio y magnesio parece ser atribuible, en gran medida, a procesos de hidrólisis de minerales silicatados, y de cuarzo amorfo adsorbido o disuelto a partir de la sílice.

El hierro y el manganeso aumentan en la solución por disolución de siderita, pirita y marcasita, desorción y reacciones Redox. Ambos comienzan a precipitar a una distancia ligeramente superior a 150-200 m. de los ríos Eresma y Voltoya. Simultáneamente se ha detectado un incremento de la concentración en bicarbonato y un ascenso del pH.

Los procesos de denitrificación van acompañados de un agotamiento de oxígeno, procesos de intercambio iónico de Carbono Inorgánico Total, y de los sulfatos por bicarbonato y CO_2 , aumentando la concentración de calcio.

Al aumentar el potencial Redox aumenta repentinamente la concentración en nitratos a partir de la materia orgánica de origen natural (de forma inversa a la oxidación de la pirita), disminuyendo el contenido de hierro en el fluido, y, en menor medida, de calcio, bicarbonato y manganeso. A medida que decrece la pirita por oxidación y la concentración de Ca , SO_4^{2-} y HCO_3^- , aumenta la concentración de oxígeno en el sistema, sin apreciarse movilización del hierro y de los nitratos.

Cuando la pirita se ha consumido se ralentiza el proceso de generación de sulfatos, acompañado de un aumento del pH por efecto de la calcita presente en el fluido diagenético. En esta etapa, las principales reacciones son la oxidación del amonio y del carbono orgánico disuelto presente en las aguas de recarga artificial, así como el consumo de oxígeno y nitratos por parte de la materia orgánica de origen natural relictica. La misma materia orgánica podría contribuir a los procesos de reducción de sulfatos y generación de SH_2 .

Posteriormente, la producción de CO_2 por reacciones de oxidación y la negativización del índice de saturación de la calcita provocan un descenso del pH y, aparentemente, un consumo de la pirita y calcita en el sistema.

El resultado es una reducción de nitratos, dominada por la oxidación de la materia orgánica y de la pirita; y un aumento de sulfatos a medida que aumenta el tiempo de residencia del agua en el acuífero.

Más tarde, los hidróxidos de hierro dominan los procesos oxidantes, aumentando la concentración en hierro, manganeso, amonio y carbono orgánico en los pozos de bombeo en concentraciones que quintuplican las del agua de recarga.

En general se aprecia que los procesos generados en la *Cubeta*, coinciden, en líneas generales, con los observados en otras plantas de recarga artificial suficientemente estudiadas.

- Acuífero profundo:

La evolución hidroquímica previsible de las aguas, a medida que aumenta su profundidad en el acuífero, de acuerdo con la evolución hidroquímica detectada en captaciones profundas, se basa en un predominio de la evolución de las facies bicarbonatadas cálcicas hacia un estado clorurado sódico en condiciones reductoras. Estas condiciones pueden haber sido propiciadas por la oxidación de la materia orgánica hasta profundidades que podrían coincidir con el espesor de arena en las paleocubetas (58 m como máximo), y por la actividad de microorganismos que generan CO_2 en su respiración en condiciones reductoras.

Los procesos dominantes, a medida que aumenta la dirección del flujo y la profundidad son:



- Respiración aeróbica con generación de CO_2 y agua.
- Procesos de denitrificación, generándose N_2 , CO_2 y agua.
- Reducción del hierro (III), y Mn (IV), generándose hierro, CO_2 y agua.
- Reducción de sulfatos, generándose ácido sulfhídrico, CO_2 y agua.

Durante la filtración, los **nitratos** y el **oxígeno** disuelto tienden a disminuir con relativa rapidez.

– Como **tendencias evolutivas comunes**, merecen destacar las siguientes:

En principio, la calidad del agua está controlada por la disolución de carbonatos, silicatos y sales del suelo. A mayores profundidades por el intercambio catiónico de Ca y Mg por Na adsorbido. La presencia de yeso en algunos sectores del acuífero conlleva la evolución de facies bicarbonatadas sódicas a sulfatadas sódicas.

El ión amonio incrementa las reacciones de intercambio iónico de sodio por calcio, pero el calcio tiende a precipitar en forma de calcita.

El proceso va acompañado, además, de reacciones de reducción de sulfatos y de precipitación de hierro y manganeso, generando oxi-hidróxidos de **hierro** con rapidez a partir de hierro disuelto en condiciones aeróbicas neutras y alcalinas.

El agua gana alcalinidad, adquiriendo una composición bicarbonatada sódica.

El problema del hierro y manganeso en el acuífero puede ser regulado ajustando el pH en las aguas de recarga, con objeto de minimizar la concentración de estos iones en las aguas recuperadas. Para ello es preciso un seguimiento exhaustivo, muestreando en distintos ambientes y a distintas profundidades. En la mayoría de las experiencias realizadas en USA se ha comprobado que un ligero aumento del pH hasta 8 u 8,3 ha servido para controlar la disolución de Fe y Mn (*Schnoebelen et al, 2003*).

En cuanto a los **carbonatos**, la adición de carbonatos aumenta la temperatura del agua, permitiendo controlar el pH del medio cuando predominan los procesos de oxidación de la pirita en el acuífero.

En general, se aprecia que la presencia de calcita en el sistema y la temperatura de las aguas de recarga con respecto a las del acuífero son parámetros que condicionan en gran medida la precipitación de encostramientos en el acuífero. Su control es viable y relativamente poco oneroso si se aplican las medidas adecuadas.

Las **fases nitrogenadas** son más impredecibles que las sulfurosas. El nitrógeno gas es la especie más estable en la mayor parte de las condiciones naturales de Eh-pH. La génesis de nitratos requiere de condiciones fuertemente oxidantes, mientras que la génesis de amonio requiere unas fuertemente reductoras. Una vez que las fases se encuentran en disolución, el equilibrio metaestable amonio-nitrato es un caso frecuente en las aguas subterráneas.

En condiciones oxidantes la persistencia de **nitratos** es mayor en el tiempo. Esta observación se interpreta por la producción de procesos de denitrificación durante la

infiltración, como consecuencia de la interacción de la materia orgánica de las aguas de recarga, del caz y del acuífero, así como por la presencia de minerales sulfurosos en el medio. Además la mineralización de materia orgánica representa una fuente de amonio, independientemente de que haya una fuente de nitrógeno externa.

En la horizontal, estudiando los perfiles hidroquímicos entre el caz de recarga o río y los pozos de extracción, se aprecia que la tendencia evolutiva en este tipo de acuíferos detríticos presenta predominio de los siguientes iones disueltos en el medio a medida que aumenta la distancia:



En principio el medio presenta gran cantidad de oxígeno disuelto, que arrastra nitratos de la Zona No Saturada (ZNS) y, a medida que prospera el flujo, son reemplazados por sulfatos presentes en sobresaturación en las aguas subterráneas en un proceso de envejecimiento hidroquímico normal, alcanzando el valor máximo a partir de 2 km aproximadamente.

En la vertical, la máxima concentración de nitratos en las aguas subterráneas en una zona regable con aplicación de estiércol se produce antes de 15 metros de profundidad, donde existe un ambiente hidroquímico denitrificante de al menos dos metros de espesor (*Böhlke, 2002*). Este ambiente geoquímico coincide con la máxima concentración en sulfatos, derivada de los procesos de oxidación de los sulfitos.

La concentración de **oxígeno disuelto** en las aguas de recarga y en el acuífero es determinante de la concentración de nitratos con la profundidad, así como la distribución de burbujas en el acuífero.

En relación a los humedales, el nitrógeno y fósforo tiende a disminuir en ambientes salinos. La microbiota se ve alterada por la introducción en el acuífero, alcanzando condiciones de equilibrio años después.

Esta línea de investigación queda abierta y con constante atención sobre las Mejoras Técnicas Disponibles (MTD) que puedan surgir en el futuro próximo.

- **Otros aspectos**

Resulta absolutamente recomendable la instalación de dispositivos para el tratamiento de los efluentes, como por ejemplo balsas de oxidación, o técnicas complementarias como el tratamiento suelo-acuífero (SAT), desinfección por bacterias fijadoras instaladas en un medio granular y tratamiento químico para niveles perjudiciales de metales pesados tipo arsénico.

El hecho de presentar un trabajo de investigación relativo a actuaciones escasamente desarrolladas y que se encuentran actualmente en curso, posibilita la difusión de la metodología que se está empleando y que está previsto realizar, dejando una puerta abierta a contribuciones técnicas de terceros que permitan mejorar las actuaciones planificadas.



A la vista de las condiciones de referencia estudiadas y de la experiencia tras casi dos ciclos de recarga, se puede decir que no se ha encontrado ningún impedimento técnico que imposibilite llevar a cabo las actuaciones propuestas, que tendrán un efecto positivo en la calidad de las aguas previamente al plazo de implantación de la Directiva Marco del Agua (año 2015), si bien hay una gran cantidad de contratiempos técnicos y jurídicos que es preciso solventar para la mejora de las instalaciones y dispositivos. Del mismo modo, las experiencias obtenidas parecen aplicables con facilidad y rapidez a escenarios análogos, creando pruebas piloto que deben tener una duración de, al menos, dos años para comprobar su sostenibilidad.

El programa de vigilancia y control de la calidad debe integrar las labores de mantenimiento en un horizonte de 5 a 20 años. En él deben quedar atendidos los efectos mecánicos, biológicos, químicos y bioquímicos que pueden experimentar variaciones con fluctuaciones periódicas del nivel freático.

El conocimiento del acuífero permite prever su comportamiento ante la recarga artificial y realizar previsiones sobre el resultado de los procesos de interacción a largo plazo, así como diseñar metodologías de tratamiento del acuífero y de las aguas de recarga.

Un **tratamiento integral** apropiado de todo el conjunto permitirá minimizar los impactos ambientales que operan sobre la calidad de las aguas de recarga artificial y sobre el medio receptor, y preservar las instalaciones para que mantengan el mayor **“óptimo de recarga”** posible, dentro del marco del desarrollo sostenible y de los objetivos de calidad preestablecidos.



MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES RELACIONADOS

Hemos llegado a un momento de la historia en que debemos orientar nuestros actos en todo el mundo atendiendo con mayor cuidado a las consecuencias que puedan tener para el medio. Por ignorancia o indiferencia podemos causar daños inmensos o irreparables al medio terráqueo del que dependen nuestra vida y nuestro bienestar. Por el contrario, con un conocimiento más profundo y una acción más prudente, podemos conseguir para nosotros y para nuestra posteridad unas condiciones de vida mejores en un medio más en consonancia con las necesidades y aspiraciones del hombre. Las perspectivas de elevar la calidad del medio y de crear una vida satisfactoria son grandes. Lo que se necesita es entusiasmo, pero, a la vez, serenidad de ánimo; trabajo afanoso, pero sistemático. Para llegar a la plenitud de su libertad dentro de la naturaleza, el hombre debe aplicar sus conocimientos a forjar, en armonía con ella, un medio mejor. La defensa y el mejoramiento del medio humano para las generaciones presentes y futuras se han convertido en meta imperiosa de la humanidad, que ha de perseguirse al mismo tiempo que las metas fundamentales ya establecidas de la paz y el desarrollo económico y social en todo el mundo, y de conformidad con ellas.

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano.
Estocolmo, 1972.



ÍNDICE DEL BLOQUE 4

MEMORIA

	Págs.
ÍNDICE DEL BLOQUE 4	687
1. INTRODUCCIÓN	691
1.1. OBJETIVOS	692
2. HILO CONDUCTOR	694
3. MATERIALES Y MÉTODOS	695
4. ESTADO DEL ARTE	697
4.1. LA IMPORTANCIA DE LAS ZONAS HÚMEDAS	697
4.2. EXPECTATIVAS DE LA RECARGA ARTIFICIAL. APLICACIÓN A LAS ZONAS HÚMEDAS	699
4.3. LOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL. ESTADO DE LA CUESTIÓN	701
4.3.1. Sistema PER	702
4.3.2. Sistema DFPSIR	702
4.4. LAS ZONAS HÚMEDAS. MARCO LEGAL	703
4.4.1. El Plan Estratégico Español para la conservación y uso racional de los humedales	704
5. DEFINICIÓN DEL ENTORNO PREOPERACIONAL	705
5.1. ENCUADRE REGIONAL. LOS SISTEMAS DE LA DEPRESIÓN DEL DUERO	705
5.2. LOS SISTEMAS DEL ACUÍFERO DE LOS ARENALES	706
5.2.1. Descripción del estado preoperacional	708
5.2.1.1. Toponimia	708
5.2.1.2. Geomorfología	708
5.2.1.3. Hidrología superficial	709
5.2.1.4. Hidrología subterránea	709
5.2.1.5. Paisaje	712
5.2.2. Unidades Ambientales definidas en la zona de estudio	715
5.3. ACTUALIZACIÓN DEL CATÁLOGO DE HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO	719
5.3.1. Rasgos comunes a los humedales del Complejo de Coca-Olmedo	729
5.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL COMPLEJO	734
5.4.1. Caracterización morfométrica	734
5.4.2. Caracterización hidrogeoquímica	736
5.4.3. Caracterización ecológica	744
5.5. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	751
5.5.1. Clasificación genética	751
5.5.2. Clasificación litológica e hidroquímica	752
5.5.3. Otras clasificaciones	753
5.6. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES CATALOGADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO. UNA NUEVA PROPUESTA	755
5.7. HUMEDALES CONECTADOS CON ACUÍFEROS EN LA ZONA DE ESTUDIO	763
5.8. GRADO DE PROTECCIÓN DE LOS HUMEDALES EN LA ACTUALIDAD	766
6. DISEÑO Y APLICACIÓN DE CRITERIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL	768
6.1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	768
6.1.1. Agentes y procesos históricos desencadenantes del desequilibrio hídrico	769
6.1.2. Impactos ambientales detectados en campo	774
6.1.3. Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación	784
6.1.3.1. Adopción de un sistema de indicadores de vulnerabilidad	786
6.1.4. Impactos directos e indirectos de la recarga artificial (AR)	790
6.1.4.1. Impactos directos de la construcción de la infraestructura de recarga artificial	798
6.1.4.2. Impactos indirectos previsibles	799
6.1.5. Resultados. Listados de identificación y chequeo de impactos	800
6.1.5.1. Ficha de caracterización para la identificación de impactos en humedales	801



6.1.5.2.	Ficha abreviada para la identificación de impactos en humedales relacionados con actividades de recarga artificial.....	804
6.1.6.	Seguimiento de la evolución de la recarga artificial, humedales y otros elementos	806
6.2.	INGENIERÍA AMBIENTAL. DISEÑO DE UN SISTEMA DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES ESPECÍFICO	807
6.2.1.	Diseño y aplicación de un sistema de indicadores de impacto ambiental.....	808
6.2.2.	Indicadores medioambientales de estado.....	814
6.2.2.1.	Cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de estado	821
6.2.3.	Indicadores medioambientales de presión	822
6.2.3.1.	Cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de presión.....	829
6.2.4.	Indicadores medioambientales de respuesta	830
6.2.4.1.	Posibilidades de cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de respuesta	840
6.3.	EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS IDENTIFICADOS	841
6.3.1.	Diseño de polígonos de evaluación multicriterio específicos.....	841
6.4.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA EN UN ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (ESIA)	846
6.5.	DISEÑO DE UN PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL	848
6.5.1.	Actuaciones concretas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos	848
6.6.	PROPUESTAS PARA LA ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA DE VIGILANCIA Y CONTROL	853
6.7.	DISEÑO DE UN PROGRAMA DE EMERGENCIA	855
6.8.	PROPUESTAS PARA EL DISEÑO DE UN CÓDIGO DE BUENAS PRÁCTICAS RELATIVO AL SISTEMA DE RECARGA	856
7.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	857

BLOQUE 4. ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
Fig. 4.01. Esquema argumental del Bloque 4, titulado: “Medio Ambiente y Recarga Artificial. Aspectos medioambientales relacionados.”	695
Fig. 4.02. Talud de arcasas en la margen del río Voltoya en Coca, posible inspirador de la descripción de González Bernáldez: “Los Arenales, un acuífero constituido por un talud de arcasas.” ..	707
Figs. 4.03. a) y b). Drenaje de la laguna de la Iglesia y cruce de la carretera de Coca a Villagonzalo de Coca.....	710
Fig. 4.04. Restos de los dispositivos empleados para el drenaje de un humedal en el paraje del Medianero, TM de Villeguillo.	711
Fig. 4.05. La fuente del Batán. Ejemplo de fuente de alto caudal tradicionalmente, seca en la actualidad.....	711
Fig. 4.06. Franjas paisajísticas paralelas en la zona de estudio. En azul se ha representado la envolvente que delimita el “laboratorio experimental” con criterios exclusivamente geológicos.	714
Fig. 4.07. Representación tridimensional de la fisiografía de la zona de estudio, elaborada a partir del tratamiento vectorial del MDT y superposición de una cobertura ráster.	714
Fig. 4.08. Cartografía de Unidades Ambientales. Las Unidades Ambientales diferenciadas han sido: Regadíos, labor intensiva de secano, pastizal sin arbolado, humedales salinos, superficie arbolada con especies forestales (pinos) e improductivo.	718
Figs. 4.09. y 4.10. Ejemplo de un sistema de humedales en 1957, fecha del “vuelo americano” en la zona de estudio, que presentaba un aspecto típico de humedal asociado a la escorrentía superficial, del que tan sólo queda en la actualidad el humedal de las Dehesillas (n.º 30), que presentaba este aspecto en el año 2000.	720
Fig. 4.11. Cartografía esquemática con la localización de humedales en la zona de estudio e inmediaciones (elaboración propia). El recuadro indica la posible zona de influencia de las operaciones de AR.....	722
Fig. 4.12. Mapa de posición de los humedales inventariados en el Complejo de Coca-Olmedo para la situación actual sobre la ortoimagen de agosto de 2000. Representación con puntos (Página siguiente).	724
Fig. 4.13. Humedal de Aguasal, al norte del Complejo, de elevada salinidad. Inventariado con el número 23.....	727



Fig. 4.14. Humedal n.º 13 del inventario, el Horno, en la localidad de Llano de Olmedo, al norte de Villeguillo. Actualmente es utilizado como vertedero de residuos inertes ilegal, al no ser un emplazamiento adecuado para los cultivos, dado su carácter salino.	727
Fig. 4.15. Humedal n.º 1 del inventario, en Aguasal, al norte de Llano de Olmedo. Actualmente utilizado para almacenar estiércol dada la salinidad del suelo y su inutilidad para la agricultura.	728
Fig. 4.16. Humedal n.º 40 del inventario, Laguna de Caballo Alba, conectado espacialmente a humedales relicticos en el paraje de los Salobrales. Se trata de un humedal degradado y atravesado por un tendido eléctrico de alta tensión que, aparentemente, podría tener una rápida regeneración.	728
Fig. 4.17. Eflorescencias salinas en la zona de laguna del humedal de las Eras SG-2, en Villagonzalo de Coca. Humedal número 57 del inventario propio de 2004.	730
Fig. 4.18. Eflorescencias salinas y presencia de minerales salinos en el fondo del Bodón Guarrero, en Llano de Olmedo. Humedal número 12 del inventario de 2004.	730
Fig. 4.19. Mosaico de vegetación asociado a la presencia de bodones y montículos en un humedal con forma difusa típico del Complejo, (tomado de Rey Benayas, 1991).	731
Figs. 4.20 a) y b). Bodón tipo en la zona de estudio. Obsérvese el sistema bodón-montículo, las eflorescencias en el montículo y la abundancia de vegetación hidrófila, halófila y nitrófila en orlas perimetrales y su drenaje artificial en un intento de desecación. También se aprecia el canal antrópico de drenaje. Se trata del Bodón de la Hiruela, en Santiuste de San Juan Bautista, (núm. 66 del inventario), localizado a escasos metros del contacto entre las arenas eólicas cuaternarias y las facies Cuestas. Fotografías de 9 de julio de 2002 (seco) y 7 de agosto de 2003 (con lámina de agua) por efecto de fuertes tormentas en días previos.	732
Fig. 4.21. Laguna de Caballo Alba, en Villeguillo (n.º 40). Humedal ameboide, cuya orientación está condicionada por la tectónica. Corresponde al Espacio protegido SG-1. Presenta eflorescencias e impactos antrópicos diversos.	733
Fig. 4.22. Presencia de salgueros y eflorescencias salinas en las inmediaciones de la laguna de las Eras (n.º 2), en el TM de Aguasal. Estas zonas son labradas por los agricultores con la intención de cultivarlas, si bien, dada su alta salinidad, no resultan productivas y se vuelven a generar tras un periodo de tiempo.	733
Figs. 4.23) y 4.24). Situación indicadora de flujos salinos ascendentes. El nivel del agua del pozo (salino) se encuentra por encima del nivel del agua del humedal, de quimismo similar. Humedales n.º 45 (9 de febrero de 2002) y n.º 46 del inventario (7 de agosto de 2003).	738
Fig. 4.25. Pozo-charca excavado entre Ciruelos de Coca y Villeguillo, que refleja los distintos niveles mencionados del solonchacks: Tapiz arenoso eólico mezclado con turba y sales, estrato salino con precipitación de halita, silvita y anhidrita y estrato margoso de alta alcalinidad edáfica.	741
Fig. 4.26. Mapa donde consta la distribución de los humedales con datos de análisis de aguas (n.ºs 19 y 46) y determinación de parámetros inestables (n.ºs 12, 17, 19, 23, 27, 28, 45, 46, 49, 57, 66 y 67). Escala aproximada de la cartografía, 1:100.000. Mapa de fondo, cartografía del IGN a escala 1:25.000.	742
Fig. 4.27. Bodón de la Hiruela (n.º 66), en Santiuste de San J&B. El análisis de sus aguas indica una concentración en nitratos superior a 100 ppm en agosto de 2003, en plena época de riegos.	743
Fig. 4.28. Bodón de la Hiruela, en Santiuste de San Juan Bautista (n.º 66 del inventario). Subsistemas dentro del ecosistema lagunar: A) Laguna; B) Playa o litoral; C) Zona de Influencia en la cuenca de recepción y D) Cultivos.	744
Fig. 4.29. Principales factores que controlan hidrogeológicamente la variación ecológica de los humedales.	752
Fig. 4.30. Distribución de los humedales inventariados y tipo de acuerdo con su estado de conservación y funcionamiento. Escala 1:150.000. Estas tipologías son especificadas en la tabla del anexo 2.1.	758
Fig. 4.31. Cartografía donde consta la ubicación y superficie de los humedales inventariados en el Complejo de Coca-Olmedo en la primavera de 2004, clasificados de acuerdo con su estado de conservación y funcionamiento. La cartografía representa un punto de partida para el estudio de su tendencia evolutiva futura, en caso de iniciarse en la Cubeta las operaciones de recarga artificial precisas.	760
Fig. 4.32. Laguna de las Eras, catalogada de interés especial (SG-2) por la JCL. Agosto de 2003.	767
Fig. 4.33. Laguna de la Iglesia, catalogada de interés especial (SG-3) por la JCL. Agosto de 2003.	767
Fig. 4.34. El alumbramiento de aguas mediante norias y acémilas ha sido una pauta habitual en la zona de estudio durante el desarrollo agrícola de los siglos XIX y XX, hasta la implantación de la bomba con motor de explosión. (Fotografía cortesía de Luis Galán).	772
Fig. 4.35. La presencia de minerales pesados en las aguas subterráneas, especialmente arsénico, constituye un impacto de gran intensidad y escala que ha requerido soluciones inmediatas y con	

<i>fuertes desembolsos por parte de la administración para prevenir la arsenicosis. Ciruelos de Coca, febrero de 2002.</i>	<i>782</i>
<i>Fig. 4.36. Diagramas de dispersión que confrontan el balance de cloro con respecto a la acumulación de sal en los piezómetros de la RCH localizados en la UA forestal. Análisis realizados en 2003, fase sinoperacional.</i>	<i>797</i>
<i>Fig. 4.37. Factores a tener en cuenta para prever impactos ambientales futuros en el medio basados en la variación de sus elementos constituyentes.</i>	<i>799</i>
<i>Figs. 4.38. a) y b). Estación SAICA A-70, río Eresma en Villeguillo.</i>	<i>815</i>
<i>Figs. 4.39 a) y b). Aspecto del medio receptor previamente a las operaciones de AR. Muestreo superficial. Fotografías a distintas escalas.</i>	<i>835</i>
<i>Figs. 4.40 a) y b). Aspecto del medio receptor (caz de recarga) tras el primer año de actividad. Muestreo realizado en el cake superficial hasta 2-3 cm. Fotografías a distintas escalas.</i>	<i>835</i>
<i>Figs. 4.41. a) y b). Aspecto del medio receptor (caz de recarga) tras el primer año de actividad. Muestreo realizado a 15 cm de profundidad.</i>	<i>835</i>
<i>Fig. 4.42. Evaluación de impactos ambientales sobre la ficha de caracterización diseñada. El variograma permite llevar a cabo el seguimiento del humedal o elemento clave atendiendo a 5 grados de afección: bajo (1), moderado (2), medio (3), severo (4) y alto (5). Aplicación para la Laguna de la Iglesia, 2004. La elaboración de fichas consecutivas y superposición de transparencias permite detectar variaciones cualitativas en el humedal a lo largo del tiempo.</i>	<i>842</i>

BLOQUE 4. ÍNDICE DE TABLAS

	Págs.
<i>Tabla 4.01. Evolución de los recursos y demandas de agua en la Cubeta de Santiuste (modificado con datos propios de IRYDA, 1990 y MAPA, 1999a).</i>	<i>712</i>
<i>Tabla 4.02. Humedales inventariados por Rey Benayas en la zona de estudio, 1990.</i>	<i>721</i>
<i>Tabla 4.03. Humedales inventariados por Rey Benayas e ICONA en la zona de estudio, la mayoría de los cuales son espacios protegidos en la actualidad.</i>	<i>722</i>
<i>Tabla 4.04. Humedales del Complejo Coca-Olmedo que cumplen las condiciones de “hidrodependientes.” La leyenda de las columnas es similar a la empleada en la tabla 4.04. El color corresponde a la categoría otorgada según la clasificación propuesta.</i>	<i>765</i>
<i>Tabla 4.06. Tipos de suelos presentes en la Cubeta de acuerdo con la clasificación de la FAO (1998).</i>	<i>786</i>
<i>Tabla 4.08. Listado de chequeo de los impactos ambientales identificados en humedales relacionados con operaciones de recarga artificial.</i>	<i>804</i>
<i>Tabla 4.09. Tabla de chequeo simplificada. Impactos ambientales identificados en la actualidad y previstos para el futuro que operan en los humedales y los dispositivos relacionados con operaciones de recarga artificial.</i>	<i>805</i>
<i>Tabla 4.10. Diseño de la tabla empleada para el cálculo del sistema de indicadores medioambientales de presión: modernización y mejora de dispositivos.</i>	<i>825</i>



BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

1. INTRODUCCIÓN

España es un país que ha alcanzado la *madurez hídrica* en la década de los 70, es decir, su demanda ha sobrepasado la mitad de sus recursos disponibles (LBAE, 2000b). Esta resulta una de las claves de haber alcanzado el grado de desarrollo del que disfruta el estado español, fundamentándose en los Planes de Desarrollo y en el aprovechamiento integral y combinado de los recursos. No obstante, la gestión hídrica ha traído ciertos problemas cuantitativos y cualitativos nada desdeñables que han afectado a zonas de gran valor socioeconómico, ecológico y cultural (Fdez. Escalante y Cordero, 2002).

La adopción de nuevas técnicas en defensa de los recursos hídricos, como es la recarga artificial, se perfila como una herramienta valiosa, esperanzadora y capaz de solventar algunos importantes problemas medioambientales que afectan a nuestra zona de estudio, y, por ende, a un abultado número de humedales del país.

En este contexto, con multiplicidad de factores involucrados, se atisba un común denominador con otros esfuerzos anteriores, basados en una filosofía y una ética tendente a que las sociedades caminen hacia unos principios de unificación, coordinación, desarrollo sostenible, y respeto a los recursos naturales, y en el caso concreto de los recursos hidráulicos, el camino hacia el “*buen estado de las aguas*”, incluyendo éste “el buen estado de las zonas húmedas.”

Entre estos esfuerzos cabe destacar el que quizás ha sido el embrión de este sentir colectivo, que es la Carta Europea del Agua proclamada por el Consejo de Europa en Estrasburgo el 6 de mayo de 1968, cuyos principios componen gran parte de los pilares de algunas disposiciones legales proteccionistas, como puede ser la DM o el Plan Estratégico español de humedales, por citar algunos. En dicha carta aparecen algunos “*credos*” que pueden venir a cuento para el fin pretendido (estudiar cómo se puede emplear la técnica de la AR en la recuperación de espacios degradados de alto valor medioambiental), como son:

- *No hay vida sin agua. Es un bien valioso, indispensable para todas las actividades humanas.*
- *Los recursos de agua dulce no son inagotables. Es imprescindible preservarlos, controlarlos y, si es posible, acrecentarlos.*
- *Alterar la calidad del agua significa perjudicar la vida del hombre y de los demás seres vivos que dependen de ella.*

Siguiendo el esquema establecido en los restantes apartados de este proyecto de investigación, se presentan los objetivos y el estado del arte como etapas previas a la discusión y alcance de una serie de conclusiones.



1.1. OBJETIVOS

Las pretensiones del bloque se centran, por un lado, en recopilar y ampliar la información de mayor interés medioambiental del medio físico y del conocimiento hidrogeológico de la zona de estudio, focalizada especialmente sobre los humedales y las zonas regables, principales integrantes del *entorno preoperacional*.¹ Por otro lado se pretende diseñar parámetros y guías para su recuperación y seguimiento.

La definición del entorno preoperacional y el desarrollo de los objetivos están inspirados parcialmente en el artículo 2.1.² de la Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del RDL 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental. Algunos de los objetivos guardan cierto paralelismo con dicho artículo:

- Mejora del conocimiento medioambiental del medio (definición del entorno preoperacional) e hidrogeológico (definición de las condiciones de referencia), describiendo en qué manera el “progreso” ha incidido sobre los humedales preexistentes, como consecuencia de la implantación pretérita del regadío, y la implantación futura de la infraestructura precisa para la recarga artificial.
- Identificación de impactos que han actuado sobre el medio y provocado el desequilibrio hídrico (impactos pretéritos, actuales y futuros previstos).
- Una vez alcanzado un alto grado de conocimiento del medio, proponer una serie de actuaciones específicas inherentes a las actuaciones de recarga, tendentes a reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos, cuyo seguimiento pueda llevarse a cabo empleando un sistema de indicadores medioambientales específico y un variograma dinámico que se ajuste a un polígono de evaluación multicriterio. Ambos deberán reflejar el grado de idoneidad de las actuaciones y validar el sistema de indicadores, o bien servir para desvelar pautas para su modificación, en correspondencia con el punto d) del artículo 2.1.
- Por último, proposición de un *código de buenas prácticas* relativo al sistema de recarga y a los impactos identificados que contenga un *Programa de Vigilancia* y

¹ En el desarrollo de este trabajo se diferencia el concepto “entorno preoperacional”, acuñado en la legislación medioambiental del RD 1131/88 interpretado como características del terreno en el que va a llevar a cabo una actuación en sentido amplio, del término “condiciones de referencia”, acuñado por la directiva 2000/60/CE, interpretado como condiciones cualitativas y cuantitativas de las aguas y de todos los agentes, procesos y circunstancias que propician su estado. Ambos términos pueden ser considerados sinónimos.

² Artículo 2.1. (.../...):

- a) Descripción general del proyecto y exigencias previsibles en el tiempo, en relación con la utilización del suelo y de otros recursos naturales. (.../...).
- b) Una exposición de las principales alternativas estudiadas y una justificación de las principales razones de la solución adoptada, teniendo en cuenta los efectos ambientales.
- c) Evaluación de los efectos previsibles directos o indirectos del proyecto sobre la población, la fauna, la flora, el suelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio histórico artístico y el arqueológico.
- d) Medidas previstas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos.
- e) Programa de vigilancia ambiental.(.../...).

Control basado en el seguimiento de la evolución de los indicadores y un *Programa de Emergencia* para situaciones excepcionales, que desembocarán en un corolario provisional de normas técnicas aplicadas, que sean extrapolables para actuaciones desarrolladas en ámbitos análogos, en consonancia con el apartado e) del citado artículo. En él queda de manifiesto la necesidad de iniciar las tareas de delimitación real del área de influencia y regulación del uso público en estas áreas con objeto de restablecer sus condiciones ecológicas.

El entorno preoperacional, como espacio tridimensional que es, va a ser definido para la “*situación actual*”, de acuerdo con unas circunstancias cambiantes como consecuencia del mayor dinamismo que las operaciones de AR han introducido en el sistema.

En su definición se presenta un breve esbozo del estado de las zonas húmedas en la Depresión del Duero, atendiendo a su regulación legal, para abundar en los humedales adyacentes del *Complejo de Coca-Olmedo* relacionados con la zona de estudio.

Este esquema metodológico conlleva la desventaja de que el grado de afección del “*entorno preoperacional*” en la actualidad es elevado con respecto al entorno inafectado, como consecuencia principalmente del descenso de los niveles freáticos por las extracciones de agua subterránea para regadío.

El desarrollo de actuaciones medioambientales adicionales se plantea desde un punto de vista técnico, abordando colateralmente los enfoques “*económico, político y social*” que serían precisos para la ejecución de la actividad.

2. HILO CONDUCTOR

De acuerdo con el esquema operativo empleado, en este apartado se presenta una guía para el seguimiento del Bloque con objeto de organizar la presentación de la información y su consulta.

Tras introducir el Bloque y listar los objetivos propuestos se describen brevemente algunos argumentos metodológicos.

Posteriormente se presenta el contexto que afecta a las zonas húmedas en la actualidad, las expectativas de aplicar la AR en ellas y el marco legal regulador.

De acuerdo con un argumento metodológico “legalista”, se comienza la descripción del entorno preoperacional, describiendo los sistemas de humedales a escala regional y local y asignando Unidades Ambientales a cada parcela de la zona de estudio.

Posteriormente se presenta el catálogo de humedales realizado, que representa una ampliación de todos los presentados en los antecedentes, llegando a triplicar su número, buscando además rasgos comunes en todos ellos. Una vez inventariados, son clasificados por distintos criterios, destacando una nueva proposición para humedales susceptibles de recibir labores regenerativas basadas en la AR.

Entrando en criterios de “Ingeniería Ambiental”, se identifican los distintos impactos peligrosos de manera potencial o real para las operaciones de AR para los humedales y para otros elementos clave. Una vez identificados, se han diseñado fichas específicas.

Se diseña además una nueva herramienta para el seguimiento de la evolución de la recarga artificial de los humedales y de otros elementos, basada en un moderno sistema de indicadores medioambientales, que culmina en el diseño de un variograma específico, polígono que engloba un método de evaluación de impactos basado en un sistema de rangos-pesos.

Por último, dotando a la investigación de un talante más práctico, se analizan y justifican soluciones de mínimo impacto y se inicia el diseño de un Programa de Vigilancia Ambiental y de un Código de Buenas Prácticas para el acuífero extrapolable a otros análogos.

El “*hilo conductor*” aparece sintetizado en el esquema siguiente, con mención de los principales apartados (Fig. 4.01).

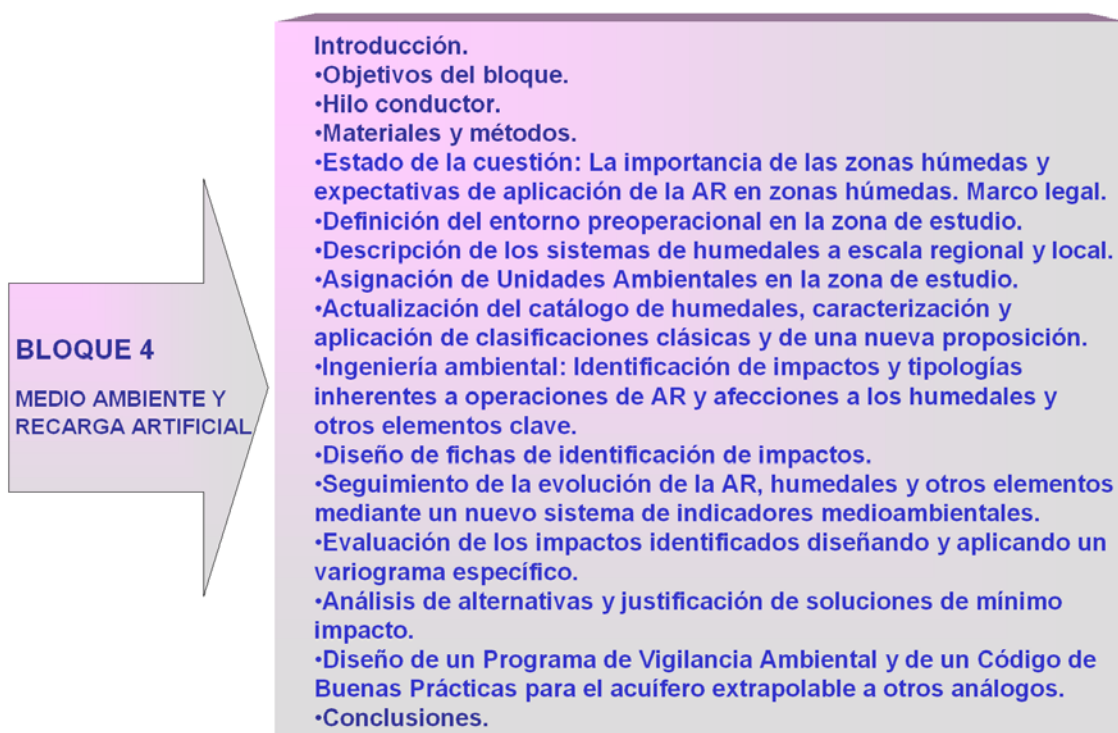


Fig. 4.01. Esquema argumental del Bloque 4, titulado: “Medio Ambiente y Recarga Artificial. Aspectos medioambientales relacionados.”

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para adoptar una metodología apropiada y de amplia divulgación, se ha seguido como pauta la “receta” tipificada en la legislación española y europea para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EsIA) de un proyecto tipo, presentada en el artículo 2 de la Ley 6/2001 de 8 de mayo, de evaluación de impacto ambiental. Parte de dicho artículo se transcribe en el pie de página del apartado 1.1.

Las fases adoptadas para el desarrollo del Bloque guardan un cierto paralelismo con esta metodología. El desarrollo de los puntos b), c) y d) ha requerido el empleo de criterios de ingeniería ambiental, en concreto el empleo y diseño de indicadores medioambientales, su inclusión en un sistema organizado, la elaboración de un polígono de evaluación multicriterio (=variograma dinámico) y la evaluación del grado de afección del entorno preoperacional en general, y de los humedales y enclaves degradados en particular.

El “estado de la cuestión” ha sido redactado a partir de la consulta y lectura de la documentación específica que aparece como citas bibliográficas, adquiridas en bibliotecas, librerías e internet.

La asignación de “Unidades Ambientales” a cada nodo de la zona de estudio se ha realizado con criterios ambientales de aceptación general. Para ello se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica tipo Arc/View, donde han sido georreferenciadas todas y cada una de las mencionadas unidades.

La actualización del catálogo de humedales para la zona de estudio se ha realizado estudiando minuciosamente en una herramienta GIS ortoimágenes a color, fotos satélite, fotogramas aéreos del “*Vuelo americano*” de 1957, visitas guiadas y, en especial, encuestas a los ancianos del lugar, quienes han visto el cambio de uso de su territorio, desde humedales a tierras de labor.

La elaboración de fichas de chequeo para la evaluación de impactos se basa en la identificación de los impactos medioambientales que operan en la zona de estudio, y en el repaso de matrices específicas de tipo *Leopold* encontradas en distintas fuentes bibliográficas (p.e. en *Gómez Orea, 1999*). De este modo se han diseñado unas “fichas de control” donde quedan recogidos un amplio número de impactos. Estas fichas no han sido dotadas de un sistema matricial de tipo *factores-acciones* para la evaluación de los impactos, ya que la evaluación se lleva a cabo mediante un variograma.

El diseño de indicadores medioambientales se apoya en el sistema PER (*Friends & Raport, 1979*), sistema que diferencia indicadores de presión, estado y respuesta. Su descripción se ha postergado para el apartado 6.2., donde es aplicado.

El diseño de un polígono de evaluación multicriterio es de inventiva propia, y se apoya en un sistema parametrizado de aceptación general de tipo *rangos-pesos*.

La adopción de un sistema adecuado y su seguimiento permitirá además comprobar si las actuaciones se están desarrollando debidamente y conocer su influencia en la calidad de las aguas y en la evolución de los ecosistemas y hábitats (especialmente en los humedales desecados y con un valor ecológico bastante pobre en general) que hay diseminados en la zona de estudio y que reciben la designación regional de “*bodones o lavajos*”.

4. ESTADO DEL ARTE

De acuerdo con el hilo argumental propuesto, en este apartado se describen varios aspectos que contextualizan una serie de generalidades de las zonas húmedas en relación con la recarga artificial. Algunos conceptos expuestos se consideran imprescindibles para el seguimiento del Bloque.

4.1. LA IMPORTANCIA DE LAS ZONAS HÚMEDAS

La interacción hombre-ambientes acuáticos se remonta a épocas ancestrales. De este modo el efecto antrópico ha contribuido al alto dinamismo de los “paisajes del agua”, dando lugar a ambientes muy diversos: lagunas, estanques, charcas, bodones, marismas, albuferas, marjales, salinas, arrozales, barrancos, ramblas, etc. A este respecto cabe destacar que España es el país con mayor diversidad de tipos de zonas húmedas de la CEE (*Casado & Montes, 1995*).

En este contexto las zonas húmedas, desde hace unos años, han cobrado un valor excepcional como reservorios de una importante biodiversidad y como unidades funcionales del paisaje (*González-Bernáldez, 1988*).

Su papel ecológico es sumamente importante al ser ambientes que operan a distintas escalas y magnitudes. A nivel global actúan como sumideros de carbono y estabilizadores del clima del planeta (*Bubier & Moore, 1994*), a nivel regional regulan el ciclo hidrológico y los ciclos biogeoquímicos, son centros depuradores de aguas contaminadas y moduladores de inundaciones (*Mitsch & Gosselink, 1993; Sandlun & Viken, 1997*); a nivel local cuentan con tres valores o funciones fundamentales: su valor científico, paisajístico, ecológico y socioeconómico (*González Bernáldez, 1992 b) y c*).

Su valor **científico** se basa en que los humedales representan auténticos laboratorios vivos para el estudio de múltiples procesos naturales.

Su valor **paisajístico** y **ecológico** se basa en su integración como factor diversificador, que no sólo se refiere a las especies, tanto por el número como por la composición (biodiversidad), sino también a otros aspectos microclimáticos, hídricos, geoquímicos, edáficos, geomórficos, paisajísticos e incluso culturales (suponiendo los factores hidrogeológicos incluidos en los aspectos previos).

El valor **socioeconómico** se basa en el aprovechamiento tradicional de los humedales y sistemas palustres, basado básicamente en la caza, la pesca y la recolección. Hasta mediados del siglo XIX fue de una gran importancia económica la recolección de las plantas barrilleras, denominadas así por la obtención de barrilla (carbonato sódico) o sosa, utilizada en la fabricación del vidrio y del jabón (*Calderón, 1895*). Muchos humedales siguen siendo puntos de mira para los usos cinegéticos y pesqueros.

A pesar de todas estas funciones, todavía hoy en día es difícil encontrar la forma de que la población del entorno acepte a las zonas húmedas (*González Bernáldez, 1991*).



Tradicionalmente y hasta mediados del siglo XX las zonas húmedas han sido consideradas lugares insalubres, improductivos y peligrosos, al albergar ciertos vectores de enfermedades, como es el caso del paludismo, eriales, etc., ya que a primera vista pueden parecer pequeños enclaves de aguas estancadas.

Como consecuencia de esta creencia, numerosas zonas húmedas fueron objeto de políticas y programas de desecación y saneamiento. Por este motivo fueron “desechadas por ley” por el Instituto Nacional de Colonización empleando las tecnologías disponibles en la fecha para convertir los humedales, especialmente los de interior, en zonas de cultivo drenadas y desecadas.

En otros casos fueron drenados, especialmente en terrenos salinos de baja productividad agrícola, induciendo una lenta agonía y dificultando su futura regeneración. Este hecho estaba apoyado en una sobrecarga de ignorancia sobre su alto valor ecológico y la afección antrópica, generalmente egoísta, que ha conducido a estas zonas a la desaparición total o parcial o a su degradación.

Según estudios realizados por el Departamento Interuniversitario de Ecología de la Universidad Autónoma, en los últimos 200 años se ha pasado de una extensión de humedales total de 280.000 a 114.000 ha en la actualidad, es decir, se ha perdido al menos el 60% de los humedales y lagos naturales españoles peninsulares, principalmente en los últimos 50 años (*MOPTMA, 1990 y 1995; Casado y Montes, 1995*), por desecación, presión urbanística, explotación intensiva de las aguas subterráneas, etc.

El 2 de febrero de 1971 fue marcado un hito histórico, ya que un grupo de expertos alzó la voz con energía, destacando su importancia: El Convenio Internacional de Ramsar (*RAMSAR, 1971; UNTS, 1976*), que fue ratificado por España en 1982 (*Davis et al, 1996*). Desde entonces, cada 2 de febrero, es el Día Internacional de los Humedales.

Tras esta ratificación, en 1985 la Ley de Aguas abogó por su conservación. Esta iniciativa fue respaldada poco más adelante por la Ley 4/1989, de Conservación de los Espacios Naturales, de la Flora y la Fauna Silvestre (*BOE, 1989*).

Ambas disposiciones han contribuido a que la sociedad tome conciencia de la importancia de las zonas húmedas, cambiando sus pautas de comportamiento y la visión de estos sistemas.

A partir de la promulgación de estas leyes, la andadura por proteger muchos de los humedales actuales cogió cierta celeridad. Sin embargo, la designación de muchos de ellos con *figuras de protección* no ha significado, en absoluto, su conservación como “unidades funcionales del paisaje” que son (*Rey Benayas, 1991*).

Uno de los factores que había pasado por alto al legislador fue considerar estos enclaves como áreas de inundación, sistemas cerrados en los que el área a proteger quedaba restringida a la zona directamente encharcada o con una lámina de agua visible y su orilla, quedando toda un área de incalculable valor para las zonas húmedas, sus cuencas de recepción o hidrográficas, fuera de toda protección.

La ignorancia de que en esta área se encierran todas las propiedades y procesos que tienen lugar en la masa de agua ha generado la destrucción y el deterioro de sistemas acuáticos que eran protegidos por ley, Parques Nacionales, Parques Naturales, Reservas Naturales, pudiendo ser citados muchos ejemplos de ámbito regional (CMA JA, 2001), etc.

Las nuevas disposiciones legales tienen en cuenta que la aproximación ecosistémica es la fuente de conocimiento precisa para cumplir los objetivos de conservación dictados en la normativa de protección de la naturaleza.

La celebración de reuniones técnicas de expertos ha supuesto una importante contribución al respecto. Por ejemplo, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), en una reunión especial celebrada en Checoslovaquia en 1992, definió una serie de objetivos de actuación centralizados en el siguiente propósito básico:

"Mejorar el conocimiento de la sensibilidad de los ecosistemas a los cambios en la calidad y en la disponibilidad de aguas subterránea. Promover métodos de gestión para asegurar el aprovechamiento sostenible del agua subterránea en armonía con los ecosistemas acuáticos que dependen del agua subterránea."...

propósito todavía vigente en la actualidad.

4.2. EXPECTATIVAS DE LA RECARGA ARTIFICIAL. APLICACIÓN A LAS ZONAS HÚMEDAS

La intensa explotación a la que se han visto sometidas algunas zonas del acuífero de Los Arenales ha originado una notable disminución de los niveles freáticos y una reacción por parte del gobierno español, realizando actuaciones de recarga artificial superficial de acuíferos para minimizar las alteraciones medioambientales.

Las labores de recarga artificial en el acuífero superficial de la Cubeta de Santiuste (declarada *obra de interés general*) han sido promovidas por la Secretaría General de Desarrollo Rural del MAPA. Tal actuación ha estado justificada, entre otras, por las siguientes razones:

- Demanda agrícola muy alta con respecto a los recursos renovables del acuífero.
- Presión por parte de los colectivos de riego de una zona con escaso desarrollo industrial e indicios de despoblación a comienzos de los años 90.
- Mejor gestión de los recursos, al utilizarse el acuífero superficial como embalse subterráneo y como sistema de distribución.
- Mayor aceptación entre los agricultores de la zona, ya que permitiría la amortización de las inversiones de las obras de captación efectuadas.
- Deterioro de la calidad química de las aguas superficiales por mezcla con aguas del acuífero profundo y contaminación de origen antrópico.
- Menor coste económico y mayor aceptación social que la alternativa de explotación del acuífero profundo.
- Pertinencia política y socioeconómica de la actuación.

Las expectativas derivadas de la recarga artificial superficial se consideran beneficiosas en casi todos los aspectos a medio plazo, si bien es previsible que algunos



lo sean a largo plazo, como es la calidad de las aguas subterráneas (*Fdez. Escalante y López, 2002b*).

Algunos de los objetivos previstos se centran en **reducir** e incluso eliminar el **descenso del nivel del agua** producido por bombeo, que en la Cubeta de Santiuste ha alcanzado valores preocupantes, obligando a los agricultores a reprofundizar sus captaciones con el coste adicional que ello conlleva, o incluso abandonarlas.

Al mismo tiempo, la *Cubeta* se perfila como un embalse regulador y almacén de las aguas subterráneas, permitiendo, por un lado, disminuir las pérdidas de agua por evaporación, y por otro lado, otorgando a los regantes una cierta independencia con respecto a las intermitencias del ciclo hidrológico, una favorable repartición temporal de las demandas y regulación de los recursos hídricos.

Este hecho está propiciado por la capacidad de almacenamiento máxima del acuífero superficial, cifrada en 24,95 hm³ (según cálculos presentados en el Bloque 2), y una capacidad de almacenamiento óptima en torno a 13 hm³ (*MAPA, 1999a*), llegando a 19,001 hm³ (Bloque 2 del presente trabajo).

Esta cifra desvela una consecuencia importante: el volumen almacenado resultaría insuficiente para cubrir las necesidades de riego en un período de sequía, como los ocurridos en la zona a comienzos de la década de 1980. La sequía es además un proceso cíclico de recurrencia relativamente baja. De ahí la necesidad de plantear alternativas adicionales de cara al futuro.

Otra expectativa es la utilización del acuífero como **red de distribución**, lo que permite evitar la construcción o instalación de conducciones de agua innecesarias y costosas (se ha constatado en campo que los trazados de tuberías en épocas de riego en el área de Villagonzalo de Coca llegan a sobrepasar los 2 km de longitud). Las diferentes derivaciones o conducciones de agua realizadas en la Cubeta de Santiuste podrían paliarse en gran medida mediante la recarga artificial del mismo con excedentes hídricos del río Voltoya.

Esta red contaría además con mínimas pérdidas atribuibles al efecto antrópico, como encauzamientos, derivaciones de agua, construcción de obras civiles, etc.

A este panorama cabe añadir que con la recarga se pretende **mejorar la calidad de las aguas**, de modo que las aguas de inferior calidad y con vectores contaminantes existentes en el acuífero encuentren un impedimento físico en su desplazamiento hacia el “*área de llamada*” de captaciones de buena calidad.

También se pretende evacuar y depurar aguas residuales urbanas aprovechando la capacidad de autodepuración del terreno para la mejora cualitativa de los efluentes y su uso posterior para regadío. Esta alternativa se considera improcedente en la actualidad, siendo más recomendable la depuración de efluentes y recarga con aguas depuradas en aras del beneficio del sistema de AR y del acuífero.

Un objetivo medioambiental escasamente considerado hasta la fecha ha sido la **recuperación y/o restauración** de parte de las **zonas húmedas** del Complejo de Coca-Olmedo aprovechando excedentes hídricos, ya que actualmente existen zonas cultivadas donde antiguamente había humedales.

Aunque la idea ha sido apuntada con anterioridad en varios foros (MAPA, 1999a, Galán et al, 2001a; Fdez. Escalante y López, 2002a y b), su expansión parece empezar a abrirse hueco.

La idea se está llevando a cabo en otros lugares del mundo. A este respecto cabe destacar el proyecto “*Augmenting Groundwater Resources by Artificial Recharge (AGRAR)*”, iniciado por el “*British Department for International Development*” (DFID) y dirigido por el “*British Geological Survey*” (BGS) en colaboración con otros organismos, y con una duración prevista de julio de 2002 a julio de 2005 (Gale, 2002).

Algunos de los criterios que deben alcanzarse en la recuperación de los espacios degradados estarán basados en buscar la coherencia ecológica, paisajística, territorial, social e institucional (Gómez Orea, 1999). Ecológica con el clima, ecosistemas, hábitats y biocenosis; paisajística en sus dimensiones visual (formas, materiales, colores, volumen), olfativa y sonora; territorial al considerar que la actividad es una pieza coherente en el entramado de usos del suelo y social en cuanto a la atención a necesidades, exigencias, aspiraciones y expectativas de la población, participantes directos en la gestión.

A este respecto cabe destacar que en el programa electoral de las elecciones municipales de 2002, la actual corporación municipal propuso la recuperación de los humedales de Villagonzalo de Coca mediante el vertido directo de aguas del caz de AR hasta la laguna de las Eras. Aunque esta idea dejaba bastante que desear técnicamente, por la gran diferencia cualitativa que se generaría entre las aguas resultantes y las nativas (salvo que se aplicaran las técnicas pertinentes) ha demostrado que un sector de la población se ha comenzado a preocupar por la recuperación de zonas húmedas, en cierta confrontación con la mentalidad e intereses de los regantes de la zona.

De cualquier modo, la puerta para el inicio de actuaciones de restauración de humedales mediante técnicas de AR ha quedado abierta, precisando un empujón económico, político, social y técnico para que la ya “vieja pretensión” se convierta en una realidad.

4.3. LOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Los indicadores de impacto ambiental son elementos del medio ambiente potencialmente afectados por un agente de cambio, por tal motivo, permiten cuantificar las alteraciones producidas por una determinada actividad.

En una primera clasificación, ya histórica, se diferencian “indicadores de realizaciones y de resultados” (Gómez Orea, 1999; EOI, 2000).

La OCDE ha sido la principal impulsora en el diseño y desarrollo de indicadores ambientales. En 1989 inició su programa sobre indicadores ambientales basado en el modelo de Presión-Estado-Respuesta (PER) (Friends & Raport, 1979).

Este modelo ha sido el seguido por la mayoría de los sistemas de indicadores en la actualidad, al estar basado en un principio de causalidad: las actividades humanas ejercen una presión sobre el medio ambiente, presión que puede provocar cambios en su

estado, y finalmente la sociedad adopta respuestas para hacer frente a las consecuencias negativas de las presiones ejercidas (CMA-JA, 2002).

Durante la década de los 90, este organismo ha desarrollado un conjunto de 10 indicadores ambientales clave (*Key Environmental Indicators*), como selección de los muchos indicadores diseñados. Éstos han sido implantados en mayor o menor grado en los países de la OCDE, con objeto de facilitar a la sociedad una información más adecuada sobre el estado del medio ambiente y el camino a seguir hacia un modelo de desarrollo sostenible.

La AEMA sigue y amplía el modelo inicial de causalidad propuesto por la OCDE, generando el sistema DFPSIR (Driving Forces – Pressures – State – Impacts – Responses) (AEMA, OCDE, en MIMAM, 1996).

Por tanto, existen dos sistemas principales de diseño de indicadores ambientales:

4.3.1. Sistema PER

Según este sistema, los indicadores pueden ser de tres tipos, de presión, estado y respuesta.

Los primeros reflejan las presiones directas e indirectas que las actividades humanas ejercen sobre el medio. Se evalúan por la importancia y la intensidad de los impactos que pueden generar estas actuaciones.

Los segundos describen la calidad del medio y de los recursos naturales asociados a procesos de explotación socioeconómica. Reflejan los cambios provocados en el medio y se pueden evaluar por métodos analíticos.

Los terceros indican el nivel de esfuerzo social y político en materia ambiental y de recursos. Se evalúan por las decisiones y actuaciones que los agentes económicos y ambientales realizan para proteger el medio ambiente.

En definitiva, la presión de las actividades humanas (indicador de presión), afecta al estado del medio ambiente y de los recursos (indicador de estado), provocando una respuesta de los agentes económicos y ambientales (indicador de respuesta). Éstos a su vez modifican el estado ambiental (indicador de estado) y las actividades humanas (indicador de presión).

4.3.2. Sistema DFPSIR

El sistema “Driving Forces – Pressures – State – Impacts – Responses” (DFPSIR) distingue cinco tipos, relacionados, a su vez, con cuatro grandes grupos de indicadores: los **descriptivos** (en el que se incluyen todos los indicadores basados en el modelo DFPSIR), los de **resultado** (comparan la situación real con una de referencia, como objetivos de políticas o niveles de sostenibilidad), los de **eficiencia** (que ponen en relación distintos elementos de la cadena causal, como las presiones y la actividad humana) y los de **bienestar general** (que se refieren a una magnitud de sostenibilidad total).

4.4. LAS ZONAS HÚMEDAS. MARCO LEGAL

En el Bloque 2 fue presentado un análisis léxico-gráfico de las principales disposiciones legislativas que afectan a las operaciones de AR y a las zonas húmedas. De todas ellas cabe comentar las siguientes, por tratar los humedales de manera específica y citar algunas de mayor especificidad:

La Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, presenta como objetivos art. 2: “a) Alcanzar el buen estado del dominio público hidráulico, y en particular de las masas de agua; (...). d) Reequilibrar las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad y economizando sus usos, en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales.”

Asimismo, en el art. 31 se especifica:

“1) el Ministerio de Medio Ambiente, en coordinación con las Comunidades Autónomas, establecerá un sistema de investigación y control para determinar los requerimientos hídricos necesarios que garanticen la conservación de los humedales existentes que estén inventariados en las cuencas intercomunitarias. 2) Asimismo, el Ministerio de Medio Ambiente y las Comunidades Autónomas promoverán la recuperación de humedales, regenerando sus ecosistemas y asegurando su pervivencia futura.”

El Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, que aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, en el capítulo V (*De las zonas húmedas*) del título V (*De la protección del dominio público hidráulico y de la calidad de las aguas continentales*), se especifican el concepto y características de los humedales (art. 111).

El texto de ambas disposiciones constituye una plataforma política actualizada para abordar la recuperación de las masas de agua degradadas.

Dentro de las disposiciones adicionales aplicables en las facetas político y social, cabe destacar las siguientes:

- *Convenio de Ramsar relativo a los humedales de importancia internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas (en Secr. Ramsar, 1996 y 1999).*
- *Convenio sobre diversidad biológica.*
- *Estrategia Paneuropea para la diversidad biológica y paisajística.*
- *Directivas europeas de aves y hábitats: Red Natura 2000.*
- *Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo sobre Uso prudente y conservación de los humedales.*
- *Propuesta de Directiva del Consejo Europeo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.*
- *Comunicación al Consejo y el Parlamento Europeo sobre una Estrategia de biodiversidad de la Comunidad Europea.*
- *Protocolo sobre zonas especialmente protegidas y la diversidad biológica en el Mediterráneo.*

- *Resolución de Barcelona para el Medio Ambiente y el desarrollo sostenible en la cuenca mediterránea.*
- *Declaración de Venecia (MedWet, 1998).*
- *Estrategia sobre humedales mediterráneos o Estrategia de Venecia.*
- Ley 4/1989 de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres.
- Ley 29/1985 de Aguas y Ley 22/1988 de Costas.
- Estrategia española para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica (*MIMAM, 1999*).
- Libro Blanco del Agua en España (*MIMAM, 2000b*).

4.4.1. El Plan Estratégico Español para la conservación y uso racional de los humedales

Una de las principales disposiciones de carácter práctico aplicable a la zona de estudio y que merece un tratamiento especial es el “Plan Estratégico.” Algunos de sus fines más destacables son (*DGCONA, 1999*):

- Garantizar la conservación y uso racional de los humedales, incluyendo la restauración o rehabilitación de aquellos que hayan sido destruidos o degradados.
- Integrar la conservación y el uso racional de los humedales en las políticas sectoriales, especialmente de aguas, costas, ordenación del territorio, forestal, agraria, pesquera, minera, industrial y de transportes.
- Contribuir al cumplimiento de los compromisos del Estado español con relación a los convenios, directivas, políticas y acuerdos europeos e internacionales relacionados con los humedales, así como a la aplicación de la Estrategia española para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica y de la Estrategia de humedales mediterráneos (*DGCONA, 1999; Skinne & Zalewski, 1995*).
- El principio de precaución debe prevalecer en el proceso de toma de decisiones sobre actividades susceptibles de causar algún impacto sobre un humedal.
- Es imprescindible sensibilizar a la sociedad sobre la necesidad de la conservación de los humedales, informando y divulgando sus valores y riqueza.

En este contexto cabe destacar la obligatoriedad de actualización del catálogo (*Alonso et al, 1996*).

Actualmente la Dirección General de Conservación de la Naturaleza se encuentra en desarrollo del trabajo "*Base de Datos sobre los Humedales Españoles*", en cumplimiento del mandato legal reseñado en el art. 25 de la Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres, y de las indicaciones al respecto de la necesidad de inventario de humedales contenidas en el *Plan Estratégico*, aprobado por la Comisión Nacional de Protección de la Naturaleza el 19 de octubre de 1999 (objetivo operativo 1.1.). Se trata de un trabajo que se está realizando en colaboración con las Comunidades Autónomas en el marco del Comité de Humedales (*Bernúes, 1997; DGCONA, 1999*). Este inventario ha servido como punto de partida para el inventario exhaustivo de humedales del Complejo de Coca-Olmedo desarrollado en este trabajo de investigación.



5. DEFINICIÓN DEL ENTORNO PREOPERACIONAL

La definición de las condiciones de referencia constituye la primera etapa para el estudio de la posible evolución ecológica del sistema hidrogeológico.

Como etapa preliminar, conviene averiguar cómo era la zona antes de comenzar los factores desencadenantes del desequilibrio hídrico que han afectado al acuífero.

Conocido el pasado reciente de la zona de estudio y su evolución, resulta más fiable especular con las pautas evolutivas del ecosistema y las consecuencias ambientales previstas, de acuerdo con las alternativas de actuación que se adopten en el futuro.

El tema es abordado desde dos escalas diferentes, una regional y otra específica para la zona de estudio.

A gran escala, se ha revisado el inventario de zonas húmedas de la Cuenca del Duero.

A escala local, el conocimiento del estado preoperacional ha sido posible analizando crónicas escritas, realizando encuestas a los ancianos del lugar y analizando ciertos indicadores testimoniales de la situación pasada del sistema. Entre estos últimos cabe destacar los topónimos de la zona, cambios en la geomorfología, en la hidrología superficial y en la subterránea (datos relativos al descenso progresivo del nivel freático).

La descripción para la fase preoperacional previa a las operaciones de recarga artificial se ha realizado definiendo las **Unidades Ambientales** que componen el sistema y sus interacciones.

5.1. ENCUADRE REGIONAL. LOS SISTEMAS DE LA DEPRESIÓN DEL DUERO

A menudo las grandes cuencas fluviales son grandes cuencas en otros sentidos. Por ejemplo, en un sentido geodinámico, al presentar amplias depresiones, en ocasiones endorreicas; o en un sentido hidrológico, al actuar como unidades de drenaje a través de los cursos fluviales; o bien en sentido sedimentológico, al haberse rellenado de sedimentos.

En una fase madura, la cuenca se presenta como una vasta extensión colmatada, de topografía predominantemente plana, a excepción de los valles excavados por los ríos.

La Cuenca del Duero ejemplifica muy bien la triple condición de cuenca: geomórfica, hídrica y sedimentaria.

Los rasgos comunes para este tipo de humedales, y en general para todos los humedales de interior de la Península Ibérica, son su pequeña o mediana extensión, carácter temporal o muy fluctuante, y, en consecuencia, no albergan grandes volúmenes de agua. Por tanto, su incidencia en la recarga de grandes sistemas acuíferos es mínima



(González Bernáldez, 1992 b y c). Lógicamente el autor no consideraba los humedales de descarga.

La implantación de sistemas lacustres corresponde a varias etapas evolutivas en las que se han superpuesto distintos agentes y procesos constituyendo humedales diversos en cuanto a biodiversidad y funcionamiento hidrogeológico se refiere.

Analizando la cobertura digital de humedales disponible para la Cuenca del Duero (ICONA, 1995; Montes, 1991 y 1995a y JCL, 2001), en esta cuenca hay catalogados 276.

Actualmente, si hay un factor común para todos ellos, este es que los sistemas han experimentado drásticas modificaciones desde la implantación del regadío intensivo (Rey Benayas, 1991; González Bernáldez, 1992a; Galán et al, 2001a).

Existe un acuífero en esta cuenca donde se ha desarrollado un importante complejo de humedales con algunos rasgos diferenciadores específicos, los sistemas del acuífero de Los Arenales.

5.2. LOS SISTEMAS DEL ACUÍFERO DE LOS ARENALES

En Los Arenales, un acuífero constituido por un “talud de arcosas”, como fue definido por González Bernáldez (en González Bernáldez, 1992c) hay buenos ejemplos de humedales interiores de distintas tipologías.

Entre ellas cabe destacar los núcleos endorreicos, dando lugar a multitud de cubetas de agua que, desafortunadamente, están desapareciendo, debido fundamentalmente a cambios en la gestión de los usos del suelo durante los años 70, con el fin de transformar los tradicionales cultivos de secano en regadío (González Bernáldez, 1992c).

También existen buenos ejemplos de humedales esteparios evapotranspirativos, muchos de los cuales no presentan agua en superficie, ya que están alimentados por aguas subterráneas que pasan de la capa freática a la atmósfera por acción vegetal (hidrohumedales) (Brinson, 1993). Dentro de este tipo quedan incluidos los bodones o lavajos y salgueros³ de la comarca de Coca-Olmedo.

Se trata de ecotonos de gran diversidad, tanto ecológica como paisajística, en gran parte como consecuencia de su alto dinamismo.

Estas lagunas, muy someras, contienen en general aguas fuertemente mineralizadas y están sometidas a cambios estacionales muy acusados, llegando a constituir ambientes paleoecológicos que constituyen reservas de biosferas pretéritas (Alonso, 2001) y ecosistemas únicos en el ámbito de la actual Península Ibérica (García-Amilibia, 1992; Rey y Herrera, 1988). Esta observación se encuentra en consonancia con las observaciones de algunos autores, según los cuales las fluctuaciones y el

³ Los salgueros son manchas blancas desnudas de vegetación con hiperconcentración de sales procedentes de la capa freática y del horizonte A del suelo (Martí, 2001).

quimismo son los rasgos ambientales con mayor influencia en la ecología de las lagunas (*Sterling, 1992; García-Amilibia, 2001*).

El contacto físico con los campos de los alrededores, generalmente cultivados, aunque tratándose de un agente limitador, proporcionan un importante ecotono, aumentando la biodiversidad en las zonas húmedas esteparias (*Rey Benayas, 1991*).

Según este último autor, las fluctuaciones restringen la vida de un importante número de especies, mientras que el quimismo impone que los organismos posean propiedades fisiológicas capaces de regular las relaciones osmóticas entre el medio interno y el ambiente.

Tanto la naturaleza del sustrato de la cuenca como las descargas regionales condicionan las características químicas de las lagunas, ya que las descargas regionales ceden cloruros y sodio, mientras el sustrato aporta sulfatos, bicarbonato, calcio y magnesio. De este modo la salinidad total depende del agua meteórica en su conjunto y las proporciones relativas entre los iones.



Fig. 4.02. Talud de arcasas en la margen del río Voltoya en Coca, posible inspirador de la descripción de González Bernáldez: “Los Arenales, un acuífero constituido por un talud de arcasas.”

De acuerdo con las referencias mencionadas en el apartado anterior, en el acuífero de Los Arenales hay catalogados 62 humedales en 1995. Muchos de ellos, de acuerdo a criterios genéticos y tipo de funcionamiento, permiten distinguir un nuevo complejo diferenciado de humedales que goza de cierta conectividad, se trata del de Coca-Olmedo (*Rey Benayas, 1991*), y en adelante nos referiremos a él como el “Complejo”.

Según la mencionada cobertura digital, los humedales del *Complejo* son siete, si bien en el nuevo inventario exhaustivo, esta cifra ha alcanzado el número de 83.

En el entorno de este *Complejo* se están llevando a cabo experiencias pioneras en recarga artificial. De este modo, la recuperación aplicando la técnica de AR de parte de los humedales del sistema que se encuentran en un estadio avanzado de degradación, puede suponer una inminente realidad, abriendo así una nueva puerta a políticas curativas sobre sistemas de alto valor que, desafortunadamente, han sido casi destruidos por el desarrollismo, a veces ciertamente alejado del desarrollo sostenible.

La singularidad hidroquímica de sus aguas subraya la necesidad de realizar sistema de AR específicos que mantengan la calidad de las aguas entre límites estrechos. De este modo se potenciaría la conservación de los ecosistemas, mientras que el vertido directo mediante derivaciones del caz de recarga principal sometería el sistema a una serie de impactos en ocasiones irreversibles e incluso sinérgicos.

Para estudiar el estado preoperacional de los humedales del *Complejo* objeto de estudio se han utilizado una serie de indicadores específicos y establecido una división de la zona sobre la base de sus unidades ambientales.

5.2.1. Descripción del estado preoperacional

La definición de las condiciones de referencia constituye la primera etapa para el estudio de la posible evolución ecológica del sistema hidrogeológico.

Los principales indicadores utilizados son de carácter tradicional, ya que son empleados para delimitar una serie de **Unidades Ambientales**. Estos son la toponimia, geomorfología, hidrología superficial, hidrología subterránea, vegetación y usos del suelo.

5.2.1.1. Toponimia

Tal es el caso de topónimos, como son Agua Caballo, El Estanque, El Pozo, Los Hoyos, Hoyo Perejil o Fuente Moya, “Los Salguero”, etc. en Villeguillo; La Grulla, el Cubón (Ciruelos de Coca), Las Arroyadas en la linde con Fuente de Santa Cruz o Fuente Minor en las pedanías de Coca y Pradillos de Barco, Las Olmas, Prado Redondo, “El Charco”, “Correlagua” o El Chorrillo, en las afueras de Santiuste, etc. En general, se concentran en la zona norte y en las inmediaciones de Villeguillo, con gran escasez en el sector sur de la *Cubeta*.

5.2.1.2. Geomorfología

La presencia de zonas deprimidas intercaladas en un paisaje ondulado denotan la existencia de encharcamientos, tanto por los depósitos sedimentarios presentes en estas zonas, por su situación relativa respecto al resto y por presentar rasgos distintivos a escala microtopográfica, como son los sistemas bodón-montículo (*Rey Benayas, 1991*), sistemas que son descritos más adelante.

La acción del hombre se manifiesta, por ejemplo, en la sustitución integral de la vegetación potencial mediterránea por pinares resineros, en la variación de perfiles, allanamiento para la implantación de cultivos y en la modificación de los sistemas



hidrológicos, con construcción de abundantes drenajes artificiales y azarbes, especialmente en la zona de rebosadero del acuífero entre Llano de Olmedo y Villeguillo.

5.2.1.3. Hidrología superficial

Las relaciones actuales entre el nivel freático y el sistema hidrológico superficial permiten estimar su funcionamiento cuando no existía una fuerte presión humana.

Los testimonios de los ancianos del lugar indican, no sin gran nostalgia, la existencia de humedales en la zona norte de la *Cubeta* (Villeguillo), donde “*había patos a porrillos*” o “*pescaban cangrejos*”, etc.

En la actualidad es fácil identificar densos sistemas de acequias y drenes, como ocurre en la vía pecuaria de Villeguillo a Llano de Olmedo, arroyos arados e integrados a los campos de cultivo, como es el caso de los *arroyos del Caño y del Hoyo* en Ciruelos de Coca, y otras actuaciones antrópicas, generalmente de carácter lineal, cruzando por las zonas más deprimidas (Figs. 4.03 a) y b) y 4.04).

La existencia de un nivel freático alto permite, no sólo la creación de charcas por su rebosamiento sobre el nivel del terreno, sino que también aumenta la escorrentía superficial al encontrarse el terreno saturado y cercano al límite de su capacidad de campo.

La presencia de contaminantes, en gran parte atribuibles al abonado, constituyen un impacto acumulativo que puede ser incrementado con las operaciones de recarga artificial, ya que es previsible que antiguos cursos de agua desecados recuperen su carácter previo al regadío, al menos durante el período de recarga, movilizand o ciertos contaminantes y distribuyéndolos en el espacio. Este proceso es previsible que conlleve una cierta capacidad de autodepuración por aportes limpios, aunque en un plazo de tiempo superior.

5.2.1.4. Hidrología subterránea

El descenso del nivel freático ha sido patente durante las tres últimas décadas. Existen indicios que permiten percibir tal descenso, e incluso cuantificarlo, como son la gran cantidad de pozos reprofundizados en la *Cubeta*, en general con perforaciones dentro de pozos de gran diámetro, la presencia de estructuras hidráulicas abandonadas, como fuentes secas, caños y norias en medio de cultivos de secano, la presencia de suelos salinos típicos del fondo de humedales en la zona sin presencia de hidrofitas, etc.



Figs. 4.03. a) y b). Drenaje de la laguna de la Iglesia y cruce de la carretera de Coca a Villagonzalo de Coca.



Fig. 4.04. Restos de los dispositivos empleados para el drenaje de un humedal en el paraje del Medianero, TM de Villeguillo.



Fig. 4.05. La fuente del Batán. Ejemplo de fuente de alto caudal tradicionalmente, seca en la actualidad.

Además de estas pruebas indiciales, hay referencias comprobadas, como son los datos relativos a medidas de niveles freáticos y balances hídricos del acuífero, generalmente tomados por la Administración desde los años 50.

A este respecto se anticipa la siguiente tabla, que muestra distintos cálculos de balance hídrico realizados en la zona de estudio (Tabla 4.01).

	1955	1977	1984	1990	1999	2001	2003
Reservas (hm ³ /año)	17,6	12,5	7,9	5,6	-0,7	-0,99	-0,959
Demandas (hm ³ /año)	0	10	5,2	3,6	2,73	3,03	2,82 a 3,28

Recursos (hm ³ /año)	5,2
---------------------------------	-----

Tabla 4.01. Evolución de los recursos y demandas de agua en la Cubeta de Santiuste (modificado con datos propios de IRYDA, 1990 y MAPA, 1999a).

Los principales procesos y agentes desencadenantes del desequilibrio hídrico son estudiados con mayor grado de detalle en el apartado 6.1.1. de este tomo: “Agentes y procesos históricos desencadenantes del desequilibrio hídrico.”

La **vegetación** también constituye un indicador de importancia para el descenso del nivel del agua.

Quizás el mejor ejemplo es el crecimiento de ciertas plantas freatófilas en áreas sin otras evidencias de la presencia de aguas subterráneas cercanas a la superficie. En diferentes puntos se han detectado juncáceas y carrizos que indican el encharcamiento temporal de su sustrato.

El regadío y su consecuente descenso del nivel freático conduce a la desaparición de ciertas especies, de sistema radicular superficial, y la pervivencia de aquéllas con raíces. Las oscilaciones del acuífero provocadas por la gestión humana han tenido implicaciones directas en la botánica local, según se describe en el apartado 5.4.

5.2.1.5. Paisaje

La falta de relieves dominantes condiciona un paisaje predominantemente llano, donde las alturas mayores se sitúan en torno a 867 m, y descienden hasta los 730 m en el cauce de los ríos Voltoya y Eresma.

La cualidad más reseñable, paisajísticamente hablando, es la sucesión de tres tipos de Unidades Ambientales genéricas en franjas paralelas de orientación norte-sur.

El sector oeste presenta las máximas prominencias. Se trata de un relieve ondulado con colinas de arcillas y margas, que delimitan un sistema de cubetas en cascada colmatado por arenas eólicas. El sustrato presenta claros indicios de salinidad y una tonalidad grisácea típica por la mezcla de margas, sales y minerales de la arcilla, con franjas de tonalidad cetrina en el collado entre las colinas, donde la humedad del suelo es mayor, y cultivos de secano cuando la salinidad del suelo lo permite. Las construcciones antrópicas son escasas, tan sólo aparece alguna granja puntual y casetas de labor.

El sector central corresponde a la *Cubeta* propiamente dicha, zona de mayor potencialidad para el riego y ocupada en su totalidad por cultivos, pastizales, secanos y

elementos antrópicos de drenaje, pivot en el sector norte, brocales de pozos, depósitos, tendidos de tuberías, casetas para enseres agrícolas y cuidado de las bombas y, hoy en día, estructuras de recarga artificial.

En el sector este hay un predominio de la repoblación de pinar, sustituto del encinar mediterráneo autóctono, del que no queda rastro evidente. Esta homogeneidad se ve interrumpida por estructuras lineales, como carreteras y una franja de casi 50 metros del tren de alta velocidad.

El desarrollo del regadío conlleva una alternancia de tonalidades verdes y amarillentas propias del secano y el barbecho. También el hecho de combinarse los usos aporta mayor diversidad paisajística a la zona central.

En contra, la mecanización del campo y producción de residuos aumenta el carácter humanizado del paisaje. El uso intensivo del recurso hídrico multiplica las obras de extracción y almacenamiento y pone en riesgo los humedales estacionales después de haber desecado la mayoría de los perennes.

En este contexto resulta fácil discretizar cinco Unidades Ambientales diferentes, coincidentes, *grosso modo*, con los usos del suelo: los cultivos herbáceos de regadío, las labores intensivas de secano, los pastizales, las repoblaciones de pino y el uso improductivo de los núcleos urbanos.

Las figuras siguientes han sido elaboradas con objeto de sintetizar la descripción paisajística de los sistemas. Están elaboradas a partir de ortoimágenes digitales del año 2000 son, por tanto, representativas del estado preoperacional, al haber comenzado la recarga artificial en noviembre de 2002 (Figs. 4.06 y 4.07).

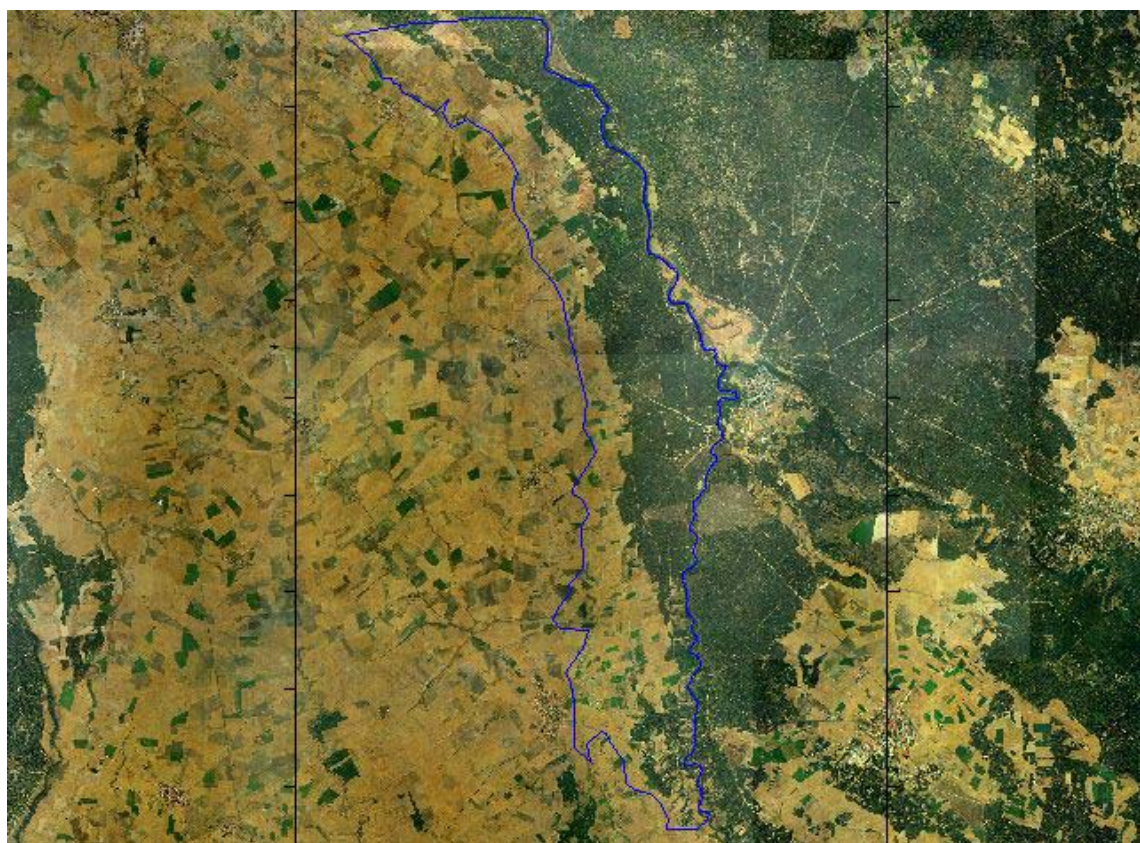


Fig. 4.06. Franjas paisajísticas paralelas en la zona de estudio. En azul se ha representado la envolvente que delimita el “laboratorio experimental” con criterios exclusivamente geológicos.

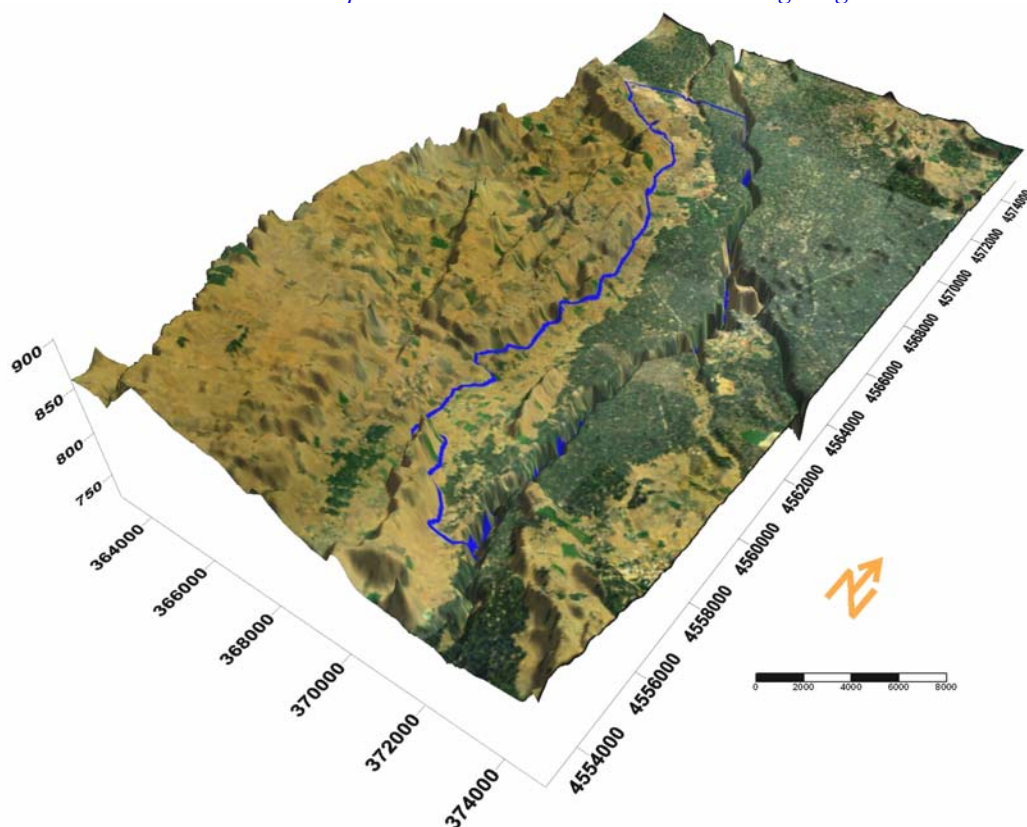


Fig. 4.07. Representación tridimensional de la fisiografía de la zona de estudio, elaborada a partir del tratamiento vectorial del MDT y sobreposición de una cobertura ráster.



5.2.2. Unidades Ambientales definidas en la zona de estudio

La mayor parte de las *Unidades Ambientales* que componen los sistemas de la cuenca resultan comunes para la zona de estudio.

Como primera subdivisión cabe distinguir la zona de intervención (ZI) de la de actuación (ZA). Ambas son diferenciadas por las actividades de recarga artificial, tanto constructivas como las relativas a su explotación. La zona de estudio más influida por las operaciones de AR es la ZI, que corresponde la práctica totalidad de la *Cubeta*; mientras que la zona en que la relación causal es indirecta, define la ZA, que comprende gran parte del Complejo de humedales de Coca-Olmedo.

A continuación se presentan y describen las unidades identificadas.

A). Regadíos

Se extienden de forma longitudinal a lo largo del sector central de la *Cubeta*, y en las zonas más productivas del ramal este, así como en la margen del río Voltoya y Eresma, donde hay riegos con tomas desde el cauce fluvial.

En los alrededores de los pueblos se suelen establecer cultivos hortícolas, como el tomate o el pimiento dedicados al autoconsumo. Aparte de éstos, cerca del 90% de la superficie en riego se dedica a la patata, fresón (en el sector norte), girasol, vid, maíz forrajero, sorgo y remolacha. La achicoria, zanahoria, ajo, calabaza, endibia, puerro, berza y cebada completan prácticamente el porcentaje. Los rendimientos oscilan entre los 65.000-70.000 kg/ha de la zanahoria y los 3.500-4.000 de la cebada. La achicoria y la cebada rondan los 45.000, mientras que la patata no alcanza a los 25.000 kg/ha.

La procedencia del agua suele ser de pozos someros, con perforaciones de profundidad inferior a 25 m. El riego es por aspersión semifija o fija, con caudales de 5.000 a 6.000 litros/hora (*MCA, MAPA, 1985/89*).

B). Labor intensiva de secano

Se han contemplado dentro de esta figura los cultivos de secano de barbecho semillado. En ellas el barbecho blanco, en general cebada, representa más del 50 % de la superficie. Las alternativas que se siguen suelen ser: Cebada (ciclo corto)-semibarbecho-cebada, cebada-semibarbecho-trigo o cebada-girasol.

Su extensión ocupa la mayoría del terreno deforestado no reemplazado por pastizales y regadíos.

Ocupa un corredor rectangular a lo largo del “acuífero oeste”, salpicado por regadíos esporádicos coincidentes con las zonas más productivas del acuífero y de menor salinidad del suelo.

Se trata de la mancha de vegetación mayoritaria tras los pinares, en clara regresión por la presión creciente del regadío y la concentración parcelaria.



El secano se encuentra mecanizado, el laboreo es correcto y el abonado suele ser de deficiente calidad. Las dosis de aplicación suelen ser de media de 95 unidades de nitrógeno por ha, 55 de fosfórico y 35 de potasa (en comparación la remolacha en regadío requiere 200 unidades de nitrógeno/ha). Esta intensidad es responsable, en gran medida, de los impactos ambientales sobre las aguas subterráneas por procesos contaminantes (MCA, MAPA, 1985/89).

C). Pastizal sin arbolado

Se incluyen en esta Unidad Ambiental los terrenos adyacentes a pinares y antiguos humedales, arenosos, poblados de gramíneas de hojas coriáceas y especies espontáneas, en general herbáceos, de ciclo anual, susceptibles de aprovechamiento por ganado. Además se suman laderas despobladas con un porcentaje variable de pastizal. Se incluyen también eriales y pastos, en general comunales, sin siembras ni labores, lo que redundará en bajos rendimientos. Abundan las gramíneas tipo *Festuca*, *Dactylo*, *Ray-Grass*, *Fleos* y algo de *trébol*.

Las extensiones principales están en la zona norte de la *Cubeta*, en el ramal este, adyacentes a extensiones de pinares de repoblación. Suelen aparecer asociados a antiguos arroyos desecados o humedales no salinos, como franja perimetral concéntrica alejada del cinturón de freatofitas.

El ganado que se alimenta de estos pastizales son vacas de raza pardo alpina y avileña de mayo a octubre. Pese a la falta de uso ordenado y racional, la carga puede estimarse en una cabeza por hectárea. El resto del año son las ovejas churras o entrefinas las que ocupan estos pastos. Este ganado lanar puede comer también en rastrojeras e incluso matorral durante el verano.

D). Humedales Salinos

Esta Unidad Ambiental puede encontrarse cubierta de una masa de agua de manera estacional o periódica. Según las encuestas realizadas, la Laguna de la Iglesia ha presentado una masa de agua destacable en tres ocasiones en los últimos cuarenta años.

Se localizan generalmente en cubetas topográficas en los materiales terciarios del sector oeste, asociados al Complejo de humedales de Coca-Olmedo. Suelen presentar un ligero depósito de arenas eólicas. También se deben incluir en este grupo los sistemas bodón-montículo (Rey Benayas, 1991). Éstos son originados en zonas con elevada concentración de arcilla superficial, no se han detectado en dunas cuaternarias.

La salinidad del sustrato impide el crecimiento de vegetación, exceptuando plantas halófilas específicas y cinturones perimetrales de vegetación hidrófila o freatofitas.

E). Superficie arbolada con especies forestales (pinares)

Representa un 58,5 % de la superficie (24,71 km²). Se extiende prácticamente de forma continua por la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma, con teselas dispersas intercaladas en la *Cubeta*.



En el extremo norte los pinares están salpicados por prados, humedales, regadíos y secanos, conformando un paisaje más diverso.

La práctica totalidad de los ejemplares plantados son pinos de la especie negral (*Pinus pinaster*) con ínfimas representaciones de chopos (*Populus spp.*), pino piñonero (*P. pinea*) y pino laricio (*P. laricio*). Entre las clases de edad, más del 70% son ejemplares con más de 50 años, lo cual constituye una buena talle y una madurez de la cubierta. La edad media es de 80 años con turnos de corta de 90 años. La cubierta oscila entre 70 y 90%, con crecimientos estimados en 0,4 m³/ha/año. Los rendimientos se ven muy afectados por la temperatura. El aprovechamiento de la miera (=trementina de pino), actualmente en recesión, ronda los 4 kg por pino y año.

F). Improductivo

Constituyen los núcleos urbanos, granjas, carreteras, vías, caminos, cauces, depósitos y construcciones antrópicas. Con la excepción de la superficie ocupada por los núcleos urbanos, la superficie es testimonial.

Las siguientes figuras corresponden a la zona de estudio sobre una ortoimagen digital, cuyos límites quedan definidos por una envolvente, digitalizada con criterios geológicos; y un bloque diagrama en el que se han representado la distribución de la vegetación en la zona de estudio y el relieve. Esta imagen es el resultado de reconstruir el relieve en 2,5 D a partir del MDT en formato vectorial y sobreponer la ortoimagen georreferenciada en formato ráster y la cobertura de los límites de la cubeta en un GIS, para después exportarlo a formato ráster (Figs. 4.06 y 4.07).

Con la información presentada se ha elaborado la siguiente cartografía de Unidades Ambientales, base para la gestión medioambiental de un territorio y requisito imprescindible para acometer EsIA y actuaciones en el mismo que requieran una EIA. Las Unidades Ambientales diferenciadas han sido: Regadíos, labor intensiva de secano, pastizal sin arbolado, humedales salinos, superficie arbolada con especies forestales (pinares) e improductivo (Fig. 4.08).

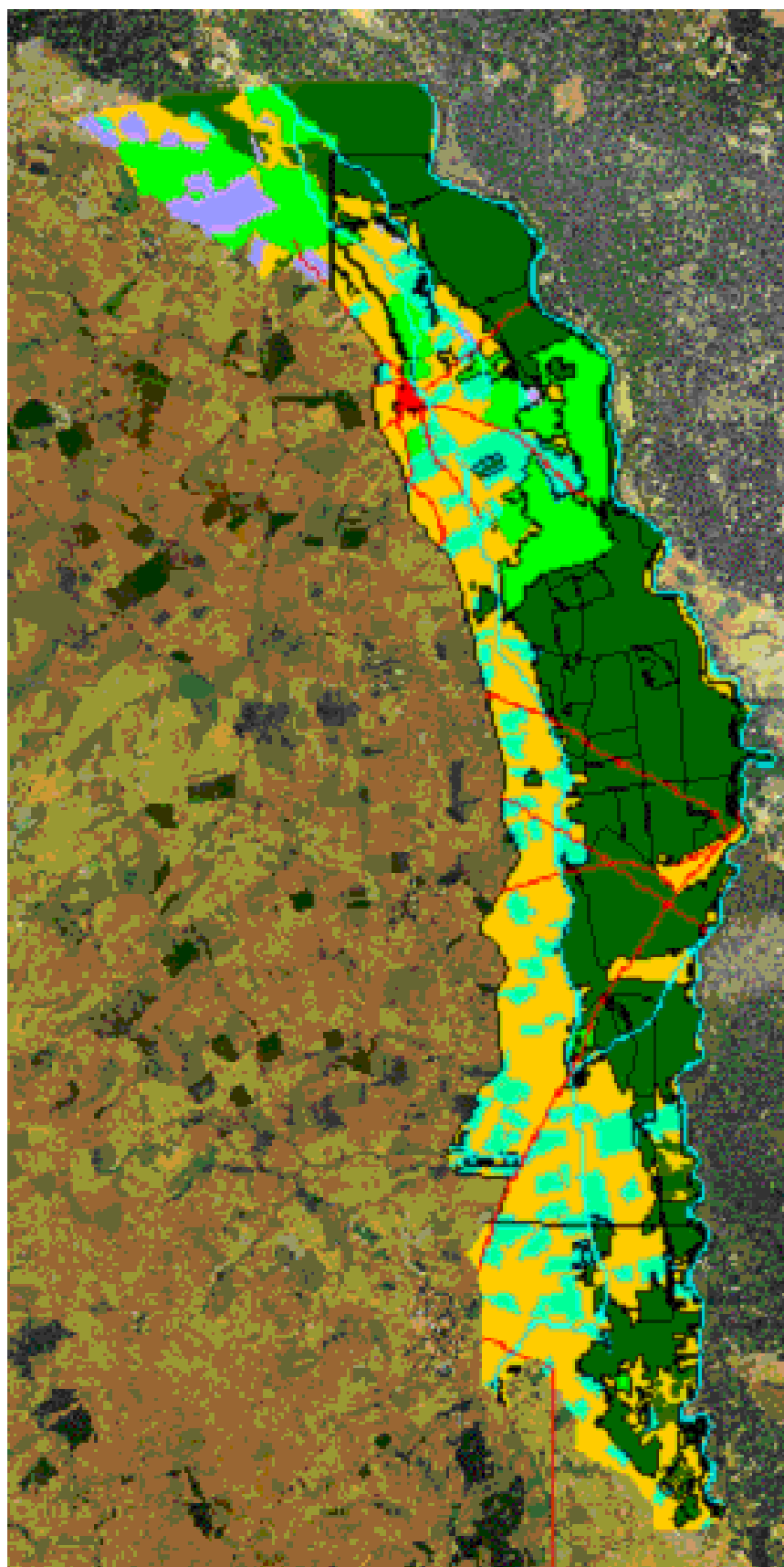


Fig. 4.08. Cartografía de Unidades Ambientales. Las Unidades Ambientales diferenciadas han sido: Regadíos, labor intensiva de secano, pastizal sin arbolado, humedales salinos, superficie arbolada con especies forestales (pinares) e improductivo.

5.3. ACTUALIZACIÓN DEL CATÁLOGO DE HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

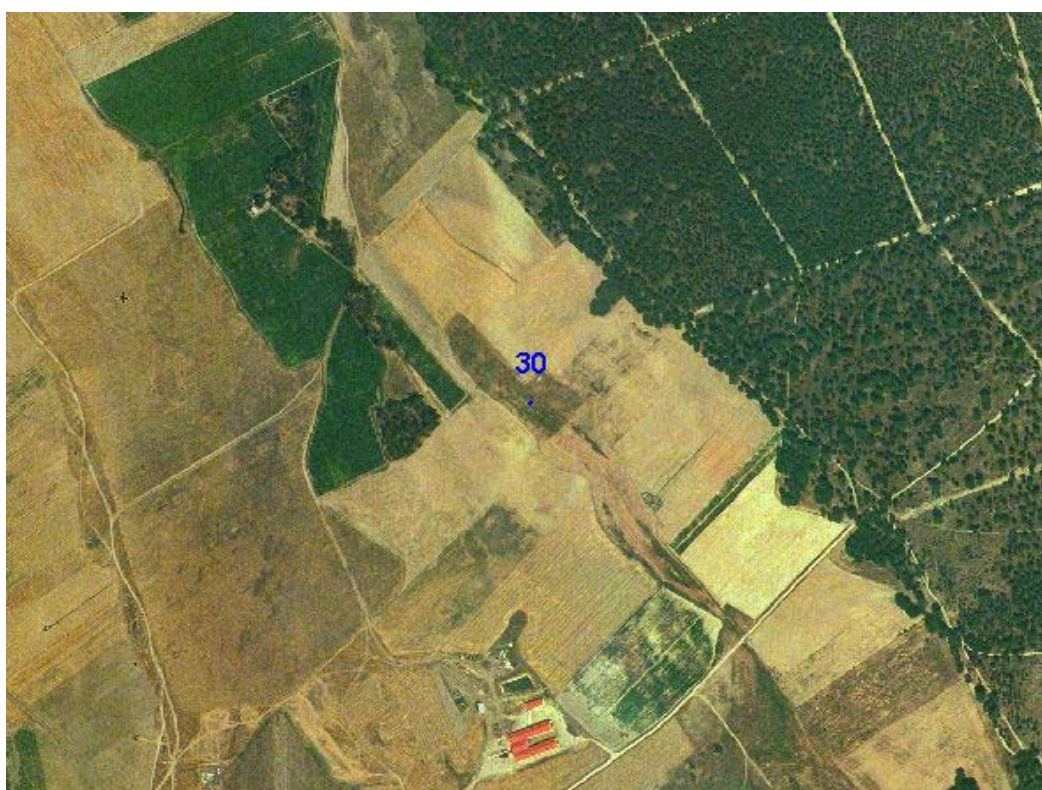
En el desarrollo de este trabajo se ha realizado un inventario exhaustivo de humedales en el Complejo de Coca-Olmedo, estudiando sus causas de degradación y estado actual de preservación. Se ha generado además una ficha técnica específicamente diseñada para su empleo como “indicador de estado” que permita “tomar el pulso” a cada humedal.

En este inventario se han establecido tres conjuntos de humedales:

- Los que gozan de alguna figura de protección, como son las lagunas de Caballo Alba (SG-1), La Iglesia (SG-3) y Las Eras (SG-2), números 40, 56 y 57 del inventario, respectivamente.
- Los que mantienen ciertas características de lavajo a pesar de su drenaje, como es el ejemplo del Bodón Guarrero o el Bodón de la Liebre, ambos en Llano de Olmedo, números 12 y 7 del inventario de humedales elaborado para la zona de estudio. Se trata de humedales que “sobreviven” con un grado de afección más o menos alto.
- Aquellos que han sido profundamente transformados presentan un grado de preservación prácticamente nulo (zonas roturadas, urbanizadas o con un uso indebido), y han sido detectados por procedimientos indirectos o indiciales mediante encuestas, crónicas o fotografías aéreas históricas. Algunos de ellos podían detectarse todavía en los fotogramas del “vuelo americano” de 1957, como es el caso de los humedales rojos, de acuerdo con la clasificación propuesta en el próximo apartado.

Por citar un ejemplo, cabe mencionar el humedal de Pedro Corbo, situado al este de Villeguillo y asociado a un sistema de humedales relacionados con el Arroyo del Cuadrón, de los cuales tan solo presenta una cierta preservación en la actualidad el “humedal de la Dehesilla” (n.º 30 del inventario).

En las fotografías siguientes se muestra el aspecto de este sistema de humedales el 8 de junio de 1956, frente a la ortoimagen digital del año 2000. En la actualidad el estado de preservación es aún menor, al haber sido cultivados estos terrenos, permaneciendo zonas salinas rodeadas de terrenos de labor. El laboreo del humedal es continuado (Figs. 4.09 y 4.10).



Figs. 4.09. y 4.10. Ejemplo de un sistema de humedales en 1957, fecha del “vuelo americano” en la zona de estudio, que presentaba un aspecto típico de humedal asociado a la escorrentía superficial, del que tan sólo queda en la actualidad el humedal de las Dehesillas (n.º 30), que presentaba este aspecto en el año 2000.

Este ejemplo representa “un caso más” de los muchos realizados en la zona. Se han realizado consultas en Internet, estudiado las principales referencias bibliográficas, analizado fotogramas aéreos y ortoimágenes digitales y realizado encuestas, averiguando que hacia 1950 había en el acuífero de Los Arenales en torno a los 500 humedales, de los cuales apenas quedan hoy 50, todos ellos en un estado de conservación muy deficiente (MAPA, 2001b).

Centrándonos en la zona de estudio, el primer inventario conocido del *Complejo* fue realizado por *Rey Benayas* entre 1988 y 1990 (en *Rey Benayas, 1990*), que consta de 16 humedales (Tabla 4.02).

NOMBRE DEL HUMEDAL	LATITUD	LONGITUD	MUNICIPIO	PROVINCIA
Laguna de Fuente Miñor	3 67 4	45 60 6	Coca	SG
Laguna de la Iglesia	3 68 6	45 62 7	Coca	SG
Laguna de las Eras	3 67 4	45 62 5	Coca	SG
Laguna de Valderruedas	3 67 3	45 63 3	Coca	SG
Fuente del Curvón	3 66 2	45 65 5	Coca	SG
La Laguna	3 66 9	45 58 9	Santiuste	SG
El Bodón	3 64 5	45 61	Santiuste	SG
Humedales de Bernuy de Coca	3 65 6	45 59 9	Santiuste	SG
Carretera de Santiuste a Fuente de Santa Cruz, km 26	3 63 6	45 62 5	Fte. de Sta. Cruz	SG
El Pelotar	3 63 4	45 64 5	Fte. de Sta. Cruz	SG
La Estevilla	3 65 7	45 63 3	Fte. de Sta. Cruz	SG
Carretera Fte. de Sta. Cruz a Ciruelos de Coca	3 65	45 65	Fte. de Sta. Cruz	SG
Los Pozuelos	3 65 4	45 66 5	Fte. de Sta. Cruz	SG
El Navazo	3 58 7	45 59	Villeguillo	SG
Laguna de Caballo Alba	3 65 5	45 67	Villeguillo	SG
Los Olmos	3 67 5	45 69 5	Villeguillo	SG

Tabla 4.02. Humedales inventariados por *Rey Benayas* en la zona de estudio, 1990.

El inventario representaba una ampliación del primer inventario nacional de humedales, el cual fue elaborado por el Instituto de Conservación de la Naturaleza (ICONA) en 1987 (información verbal). Un catálogo posterior fue el realizado por el MOPTMA en 1994. En nuestra zona de estudio e inmediaciones fueron localizados 17 humedales, los cuales se han representado en el siguiente mapa esquemático (sin escala) elaborado a partir de los datos aportados en este inventario (Fig. 4.11).



Fig. 4.11. Cartografía esquemática con la localización de humedales en la zona de estudio e inmediaciones (elaboración propia). El recuadro indica la posible zona de influencia de las operaciones de AR.

Si comparamos ambas referencias, entre las cuales existe una diferencia de cinco años, se pueden establecer las siguientes conclusiones.

- Rey Benayas localiza 16 humedales, de los cuales sólo cinco coinciden en localización (excepto pequeñas inexactitudes detectadas) y toponimia con el inventario del ICONA, que son (Tabla 4.03):

NOMBRE HUMEDAL	INVENTARIO 1987 (ICONA)		INVENTARIO 1990 (REY BENAYAS)	
	X	Y	X	Y
Laguna de Caballo Alba	365400	4567300	365500	4567000
Laguna de Valderruedas	367300	4563200	3 67300	4563300*
Laguna de las Eras	367500	4562500	367400	4562500
Laguna de la Iglesia	368500	4562700	368600	4562700
Laguna de Fuente Miñor	367400	4560600	367400	4560600

Tabla 4.03. Humedales inventariados por Rey Benayas e ICONA en la zona de estudio, la mayoría de los cuales son espacios protegidos en la actualidad.

- Por otro lado, Rey Benayas localiza once humedales que no aparecen mencionados en el inventario de 1987, con lo que o bien no fueron contemplados en este último o bien desaparecieron:
 - Fuente del Curvón.
 - La Laguna.
 - El Bodón.
 - Humedales de Bernuy de Coca.

- Humedal situado en el km 26 de la Ctra. de Santiuste a Fte. de Sta. Cruz.
- El Pelotar.
- La Estevilla.
- Humedal situado en la Ctra. de Fte. de Santa Cruz a Ciruelos de Coca.
- Los Pozuelos.
- El Navazo.
- Los Olmos.

Actualmente, y como parte de este trabajo, se ha realizado una actualización exhaustiva del catálogo de humedales y procedido a su caracterización. El fin último es estudiar la viabilidad de regenerar los humedales degradados mediante operaciones de recarga artificial si concurren los condicionantes técnicos y socioeconómicos.

La actualización del inventario de humedales en la zona se ha realizado desde la primavera de 2002, atendiendo a varios criterios técnicos, como son la correcta identificación de los humedales en base a las referencias bibliográficas existentes, tanto desde el punto de vista de la toponimia y localización georreferenciada como desde el punto de vista de su caracterización física, ecológica, bioquímica y biológica. En general se ha prestado atención a aquellos humedales de escasa entidad.

En todos los casos se ha medido en campo los parámetros necesarios para su caracterización morfométrica, con objeto de contar con datos numéricos que permitan estudiar su evolución en un futuro. A tenor de las mediciones realizadas tras ser localizados y visitados con la ayuda de habitantes de la zona, como son el Bodón Redondo, al este de Villeguillo, el Bodón de Ciruelos de Coca, en mediocre estado de conservación, el de la Cuesta de Juan Aguado, etc., se aprecia que los bodones, en general, tienen un diámetro máximo de 30 m y frecuentemente están drenados o desecados.

En el inventario se han localizado 82 humedales o zonas con indicios de haberlos habido en un pasado reciente. En la campaña de campo se han clasificado los humedales de acuerdo con su grado de preservación y de afección, que oscila entre límites anchos.

En la tabla *“Inventario exhaustivo de humedales en la zona de estudio”* del anexo 4.1.1. se presentan los humedales inventariados durante los veranos de 2002 y 2003, diferenciando humedales asociados a las aguas subterráneas, humedales asociados a la escorrentía o hidrología superficial y zonas que presentan indicios de haber sido humedales, detectadas en campo o bien mediante encuestas a los ancianos del lugar.

La tabla ha sido estructurada del siguiente modo:

- AREA. Área del humedal digitalizada sobre la ortoimagen georreferenciada sobre la base de pruebas indiciales o de forma directa.
- PERIM. Perímetro del polígono digitalizado para cada humedal y zona de influencia.
- HUM. Número dentro del inventario, ordenados de norte a sur, y como segundo criterio de oeste a este.
- NOMBRE. Toponimia del humedal, en caso de haberla.
- LOCALIDAD. Término municipal en el que está incluido.

- FECHA. Fecha de inventario.
- X, Y, Z. Coordenadas UTM y cota Z en msnm calculada con un MDT de un metro de precisión.
- SUSTRATO. Naturaleza del lecho del humedal.
- LAMINA_AGUA. Presencia de una lámina de agua en la fecha de inventario.
- C μ S/cm. Conductividad eléctrica del agua.
- pH.
- SALINIDAD %. Determinación del porcentaje de salinidad en la alícuota (medición directa).
- TSD ppm. Total de sólidos disueltos en mg/l.
- Fecha. Fecha de determinación de los parámetros inestables.
- VEG_HIDR. Presencia de vegetación hidrófila típica en el período de inventario.
- DRENAJE. Presencia de canales de drenaje del humedal (s/n).
- CULTIVOS. Presencia de cultivos en las márgenes del humedal.
- EST_CONS. Estado de conservación del 1 al 5. Los criterios son explicados en el próximo apartado.
- OTROS. Observaciones directas.

Los humedales numerados del 68 hasta el 83 corresponden a humedales relícticos y dudosos, deducidos por procedimientos indirectos, pero sin constancia de su funcionamiento en los últimos 50 años.

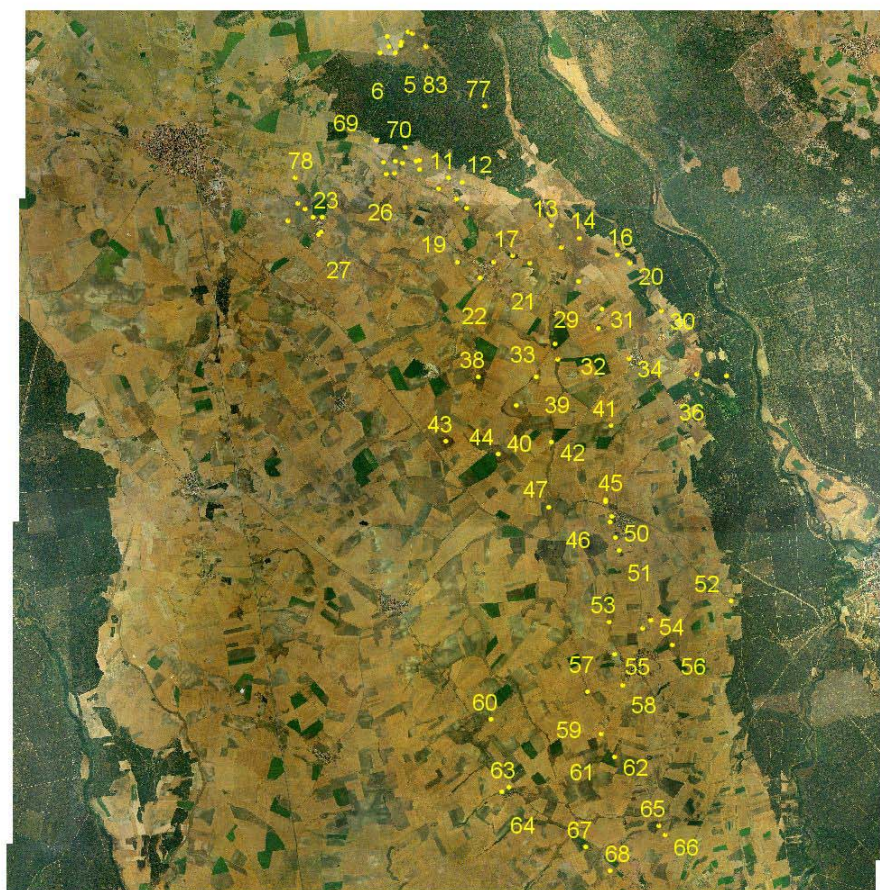
En general se aprecia que la mayoría de los humedales inventariados en la zona de estudio se encuentran en un grado de conservación muy deficiente y un valor ecosistémico muy dañado, incluso en caso de contar con figuras de protección.

Se ha diferenciado una segunda tipología corresponde a humedales “irrecuperables” debido a que las alteraciones, generalmente antrópicas, han modificado drásticamente sus características primigenias y sus rasgos distintivos.

La ubicación exacta de los humedales inventariados (anexo 4.1.1) se presenta en la cartografía 4.12.

Fig. 4.12. Mapa de posición de los humedales inventariados en el Complejo de Coca-Olmedo para la situación actual sobre la ortoimagen de agosto de 2000. Representación con puntos (Página siguiente).

HUMEDALES DEL COMPLEJO COCA-OLMEDO



ESCALA 1:150.000

 HUMEDALES INVENTARIADOS



Como una primera valoración y aproximación al estado general de los humedales en la zona, se podría decir que la mayor parte han sido desecados y cultivados, y aquellos que tenían un grado de salinidad tan alto como para impedir el desarrollo de cultivos en su interior, presentan impactos diversos (vertido de escombros, estiércol, etc.), además de haber sido roturados en varias ocasiones en vanos intentos de aprovecharlos como terrenos de labor (Figs. 4.13 a 4.15). Otros han sido afectados por el desarrollo urbanístico, como los n.ºs 28 y 34 de las afueras de Villeguillo, o por vías de comunicación, como es el caso de los humedales 52 y 60, afectados por las obras previas al tendido de la vía del tren de alta velocidad (TAV), desde finales de 2001 con carácter permanente, o el humedal de “Los Salobres”, 40, atravesado por una línea de alta tensión, etc. (Fig. 4.16).

En las siguientes figuras se presentan ciertos humedales considerados representativos:



Fig. 4.13. Humedal de Aguasal, al norte del Complejo, de elevada salinidad. Inventariado con el número 23.



Fig. 4.14. Humedal n.º 13 del inventario, el Horno, en la localidad de Llano de Olmedo, al norte de Villeguillo. Actualmente es utilizado como vertedero de residuos inertes ilegal, al no ser un emplazamiento adecuado para los cultivos, dado su carácter salino.



Fig. 4.15. Humedal n.º 1 del inventario, en Aguasal, al norte de Llano de Olmedo. Actualmente utilizado para almacenar estiércol dada la salinidad del suelo y su inutilidad para la agricultura.



Fig. 4.16. Humedal n.º 40 del inventario, Laguna de Caballo Alba, conectado espacialmente a humedales relictos en el paraje de los Salobrales. Se trata de un humedal degradado y atravesado por un tendido eléctrico de alta tensión que, aparentemente, podría tener una rápida regeneración.

La ubicación exacta de los humedales de ambos catálogos, así como los detectados en la actual campaña de campo, puede ser consultada en la cartografía de las figuras 4.12, 4.30 y 4.31, así como en la tabla 4.04.

En el anexo 4.1.2 se presentan hojas de contactos con todos los croquis, esquemas, vista aérea a escala y fotografías indicativas del estado de conservación de los humedales inventariados. El nombre del fichero corresponde al número de inventario del humedal.

5.3.1. Rasgos comunes a los humedales del Complejo de Coca-Olmedo

En este apartado se presenta una serie de caracteres comunes a todos los humedales. De este modo se puede disponer de una cierta información “*de partida*” previa a la definición del entorno preoperacional específico de cada zona húmeda.

La mayor parte de los humedales inventariados corresponden a “*humedales con forma difusa*” (Alonso, 1986; Rey Benayas, 1991), categoría en que son integrados los bodones, lavajos, lagunas y áreas encharcadizas. Presentan las siguientes propiedades:

- Están situados en zonas de descarga, generalmente en zonas llanas y bajas del pedimento o de la paramera, con frecuencia insertados en extensos prados o tierras de cultivo.
- Su zona saturada se encuentra muy cercana a la superficie del terreno.
- Presentan un endorreísmo acusado.
- Escasez o nulidad de vegetación leñosa.
- Contorno irregular ameboide, con el eje más largo en general dispuesto en orientación norte-sur o NNO-SSE. En ocasiones se presentan como manchas más o menos inconexas de simetría radial heterogénea.
- Se presentan asociados y en ocasiones alineados de acuerdo con una componente tectónica de orientación NNO-SSE, al igual que las cubetas del paleorrelieve terciario.

Generalmente constan de una cubeta circular o elíptica deprimida que constituye el centro del humedal, y una pendiente muy suave que se eleva hasta la zona cultivada, presentando unas franjas de vegetación freatofítica halófila más o menos concéntricas, hasta el cinturón perimetral xerofítico más independizado del agua subterránea, con abundancia de juncos (*Scirpus holoschoenus*). El suelo suele ser salino, con costras de precipitación y eflorescencias (Figs. 4.17 y 4.18).

El microrrelieve se ajusta a conjuntos de montículos y charcas designados “*complejos bodón-montículo*” (Rey Benayas, 1990 y 1991), interesantes formaciones micro-geomorfológicas que caracterizan el área de descarga regional del acuífero.

Son definidos como “*pequeños bodones efímeramente encharcados, de unos 5-10 m de diámetro, que alternan con montículos de aproximadamente el mismo diámetro basal y unos 1,5-2 m de altura, y que parecen corresponder a los materiales extraídos por el agua subterránea y el viento de las citadas depresiones*”.

La pérdida del horizonte A en el suelo y la alternancia de prominencias y depresiones configuran un mosaico complejo de vegetación, hidrofílica y halófila, y de suelos, originando un mosaico de vegetación hidrófila y calcícola, que queda esquematizado en la figura 4.19.



Fig. 4.17. Eflorescencias salinas en la zona de laguna del humedal de las Eras SG-2, en Villagonzalo de Coca. Humedal número 57 del inventario propio de 2004.



Fig. 4.18. Eflorescencias salinas y presencia de minerales salinos en el fondo del Bodón Guarrero, en Llano de Olmedo. Humedal número 12 del inventario de 2004.

Las causas de la erosión del horizonte A son la acumulación localizada de sales, causantes de la muerte de ciertas especies vegetales no halófilas y la posterior acción mecánica del viento, precipitación y pisoteo del ganado en el suelo desnudo.

Las descargas difusas presentan en general eflorescencias y precipitados alcalinos y/o salinos, y relictos de un horizonte A orgánico erosionado, constituyendo los “salgueros” o “toscales.” El proceso de formación de salgueros es dinámico y ocurre en posiciones intermedias de la pendiente del humedal. Su mecanismo genético es atribuido a la génesis de una *distancia crítica* entre la franja capilar y superficie del suelo (Rey Benayas, 1991) y la abundancia de procesos de percolación.

La *distancia crítica* es de escala centimétrica, por tanto, no parece viable en la actualidad simular el proceso genético de salgueros mediante operaciones de AR, principalmente porque se generan en zonas de flujos ascendentes de escala intermedia o regional. De este modo la máxima concentración de sales se produce en la zona intermedia, por tanto, hay un balance entre la infiltración y la salinidad de las aguas.

En principio parecen estar originados por mecanismos de surgencia puntuales del agua subterránea, similares a los que originan los volcanes de barro, actuando la deflación eólica como un factor modelador.

Las cubetas con agua están acompañadas de microdunas constituidas por los materiales extraídos por el agua subterránea y el viento. Cabe destacar que su aparición es exclusiva de zonas con elevada concentración de arcilla superficial y minerales salinos en eflorescencias, principales componentes de los montículos. No se han detectado en formaciones dunares cuaternarias, pero sí en los límites de la *Cubeta* y en afloramientos intercalados.

Aunque la restauración de estos tipos de humedales parece inviable mediante operaciones de AR, la recarga artificial inducida se perfila como mecanismo de AR apropiado para regenerar este tipo de humedales, siempre y cuando las aguas de recarga artificial reciban un tratamiento adecuado para que alcancen las propiedades del agua originaria, en especial la salinidad, según se estudia en el Bloque 5, apartado 4.4.5.

Algunos de los humedales susceptibles de regeneración hídrica, gracias a su estado actual, a contar con figuras de protección y por su cercanía a los dispositivos actuales de recarga artificial, se presentan en las figuras siguientes (Figs. 4.20 a 4.22).

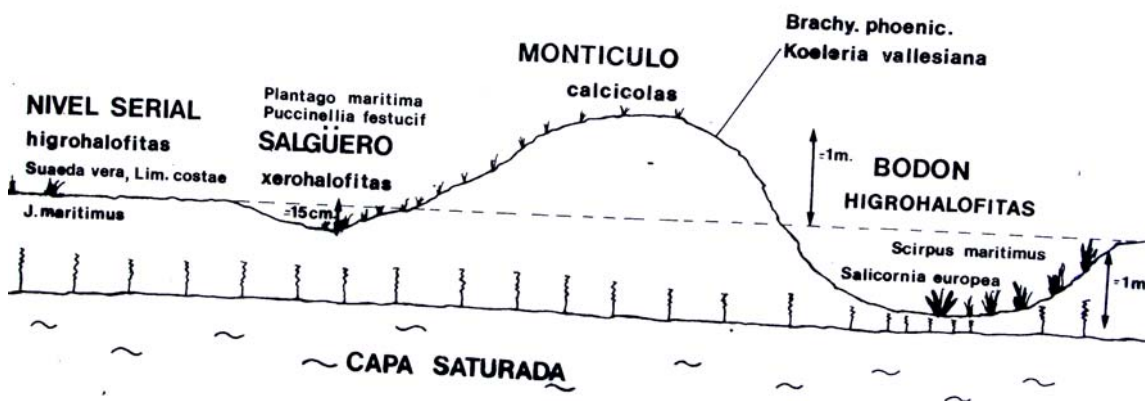


Fig. 4.19. Mosaico de vegetación asociado a la presencia de bodones y montículos en un humedal con forma difusa típico del Complejo, (tomado de Rey Benayas, 1991).



Figs. 4.20 a) y b). Bodón tipo en la zona de estudio. Obsérvese el sistema bodón-montículo, las eflorescencias en el montículo y la abundancia de vegetación hidrófila, halófila y nitrófila en orlas perimetrales y su drenaje artificial en un intento de desecación. También se aprecia el canal antrópico de drenaje. Se trata del Bodón de la Hiruela, en Santiuste de San Juan Bautista, (núm. 66 del inventario), localizado a escasos metros del contacto entre las arenas eólicas cuaternarias y las facies Cuestas. Fotografías de 9 de julio de 2002 (seco) y 7 de agosto de 2003 (con lámina de agua) por efecto de fuertes tormentas en días previos.



Fig. 4.21. *Laguna de Caballo Alba, en Villeguillo (n.º 40). Humedal ameboide, cuya orientación está condicionada por la tectónica. Corresponde al Espacio protegido SG-1. Presenta eflorescencias e impactos antrópicos diversos.*



Fig. 4.22. *Presencia de salgueros y eflorescencias salinas en las inmediaciones de la laguna de las Eras (n.º 2), en el TM de Aguasal. Estas zonas son labradas por los agricultores con la intención de cultivarlas, si bien, dada su alta salinidad, no resultan productivas y se vuelven a generar tras un período de tiempo.*

5.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL COMPLEJO

La caracterización representa un punto de partida para el seguimiento evolutivo de los humedales. La indisponibilidad de datos previos para la mayoría de los humedales inventariados imposibilita estudiar su evolución en las últimas décadas. Tan sólo se han encontrado caracterizaciones previas para ocho humedales del *Complejo* en los trabajos de *Rey Benayas, 1991*, y en documentos del área de medioambiente de la Junta de Castilla y León (www.jcl.es).

En este trabajo de investigación se plantea un procedimiento metodológico para definir el “*estado inicial*” ecológico hidrogeológico y morfométrico de los mismos en su fecha de inventariado. Esta determinación permitirá estudiar la tendencia evolutiva en el tiempo mediante la aplicación de una serie de indicadores que se plantean en el próximo apartado, si concurren ciertos factores precisos para que se realicen labores de restauración en el *Complejo*.

Se han diferenciado tres tipos de caracterización diferentes, complementarios entre sí, que permiten adquirir el grado de conocimiento suficiente de cada humedal. A pesar de presentarse de forma separada, por fines divulgativos, una caracterización debe ser entendida como un “*todo*” en la que todos los elementos están relacionados y forman una parte indisociable del sistema (*Margalef, 1983 y 1987*).

Los tres tipos de caracterización considerados son la morfométrica, hidrogeoquímica y ecológica.

5.4.1. Caracterización morfométrica

Las tipologías de humedales del *Complejo*, salvo raras excepciones, pueden ser de tres tipos: descargas lineales, charcas aisladas y bodones.

Las **descargas lineales** corresponden a sistemas de flujos locales, dominantes en paisajes disecados con características de exorreísmo por su encajamiento (*Martínez de Pisón, 1977; Rey Benayas, 1991*).

Son de forma alargada con simetría bilateral, orientadas según direcciones predominantes (bajo un condicionante tectónico). Presentan un grado de jerarquización y de conectividad en función del tipo de corriente de agua o del funcionamiento de la surgencia, en general difusa, y comparten la subcuenca hidrográfica.

En general presentan vegetación glicofílica.

Las **charcas aisladas** son los humedales dominantes en áreas de recarga de topografía suave. Presentan forma circular, tamaño pequeño (de 10 a 30 m de diámetro), aislamiento de la red de drenaje superficial, carencia de un prado húmedo alrededor, y con frecuencia aparecen asociadas a manifestaciones de salinidad del suelo. Aparecen asociadas a sustrato arenoso en zonas de recarga puntuales (*CMA JA, 2001*).

Los **bodones** son los humedales más característicos de las áreas de descarga tan llanas como la del *Complejo*.

Presentan forma difusa, contorno irregular, ameboide, sin orientación dominante, simetría radial heterogénea, lenta transición entre la vegetación xerofítica e hidrofítica, estructura concéntrica en franjas de vegetación en torno a una lámina de agua central.

Con frecuencia presentan morfología de *complejo bodón-montículo* (Rey Benayas, 1991), definidos en el apartado 5.3.1, “*Rasgos comunes a los humedales del Complejo.*”

En otras ocasiones reflejan actuaciones antrópicas de movimiento de tierras, generalmente para su drenaje e intento de destrucción. Este hecho ha incidido en algunas ocasiones en la orientación de su eje principal, que queda contra-dirección con la tónica de los restantes, como es el caso del humedal n.º 8 del inventario, *bodón de la Crijota*, en Aguasal.

Corresponden a zonas de surgencia de flujos intermedios y regionales de acuerdo con un modelo conceptual de tipo *Tóth*. Suelen aparecer con cierta continuidad espacial.

Con frecuencia la orientación de su eje más largo (A) se adapta a los procesos tectónicos que han configurado el relieve de la zona, con indicios de basculamiento y generación de unos rasgos geomorfológicos consecuentes.

Sus propiedades están condicionadas en gran medida por la distancia al borde del acuífero regional, e incluso al borde de la *Cubeta*, donde se han acumulado depósitos post-terciarios que reproducen las características de exorreísmo y glicofilia de las descargas del sistema Terciario detrítico a menor escala. Los bordes del acuífero local presentan áreas colinosas de borde de sierra, ajustándose a un modelo de ladera.

Se ha diseñado una ficha para dejar constancia de la morfometría de los humedales el período del inventariado (verano de 2002 y 2003). En ella se consideran determinados parámetros del cuenco o vaso del humedal y de su zona de influencia, añadiendo además un nuevo apartado para registrar información de relevancia, como si el humedal presenta una escala para medidas de la altura de la lámina de agua, a qué cota se encuentra cimentada o si hay antecedentes bibliográficos específicos del humedal.

Los parámetros de control elegidos son los siguientes:

- **Morfometría del cuenco:**

- Superficie máxima (km²).
- Perímetro máximo (km).
- Eje mayor “A” (longitud máxima).
- Eje menor “B” (anchura máxima).
- Profundidad máxima referida a una fecha.

- **Morfometría de la zona de influencia:**

- Superficie máxima (km²).



- Perímetro máximo (km).
- Anchura máxima de la zona de influencia (km).
- Longitud máxima de la zona de influencia (km).
- Profundidad máxima referida a una fecha.

• **Otros:**

- Escala disponible.
- Cota de la escala (base o punto de control que permita calcular la cota de la lámina de agua).
- Bibliografía específica/antecedentes donde estén reflejados datos relativos al estado del humedal.

Estas fichas funcionan como un sistema de indicadores medioambientales y reflejan diversos aspectos relacionados con sus propiedades (indicador medioambiental de estado) y su evolución a lo largo del tiempo (indicador medioambiental de respuesta). La ficha ha sido integrada a una ficha más completa de caracterización de los humedales, que se presentan en el apartado 6.2.

Como ejemplo de aplicación de esta caracterización morfométrica inicial, los datos relativos a los parámetros morfométricos más importantes de los humedales del *Complejo* se han agrupado en la tabla del anexo 4.2.1.

En el anexo 4.2.2 se presenta una hoja de contactos con fotografías tomadas de la ortoimagen del año 2000 de los humedales a escala. Con ellas se ha calculado la mayor parte de sus dimensiones morfométricas, al carecer de deformación, mientras que otras han sido determinadas en campo, como es la profundidad de la lámina de agua.

5.4.2. Caracterización hidrogeoquímica

Se basa en las características químicas de sus aguas y del sustrato. Aunque la escasez de datos de este tipo sea una constante para la mayor parte del *Complejo*, se trata de un indicador de estado de gran valor para el control de la calidad de las aguas durante y después de cualquier actuación que se pueda llevar a cabo.

Las técnicas de diagnosis empleadas para caracterizar los humedales del Complejo lagunar Coca-Olmedo son:

- **Caracterización de las aguas.** Se trata de una caracterización cuyos criterios quedan establecidos en el apartado 4.2.3 del Bloque 3. El parámetro más importante es la salinidad, al funcionar como indicador medioambiental. El conocimiento de los mecanismos de mineralización de las aguas pueden ser deducidos aplicando un análisis multifactorial de macroconstituyentes, especialmente carbonatos, sodio, magnesio (que reemplazan al calcio por intercambio catiónico) y cloruros, así como de los parámetros pH y conductividad (*Chebotarev, 1955; Florín et al, 1983; Galán et al, 2001a*).

La mineralización de las aguas lagunares resultan del proceso de mezclas de mineralizaciones de las aguas subterráneas de dos tipos:

- Por envejecimiento de las aguas subterráneas a medida que circulan por el acuífero por procesos de interacción agua-roca, proceso lento y dependiente de la longitud del circuito y la velocidad de flujo.
- Por mineralizaciones rápidas por disolución directa de evaporitas y rocas solubles del páramo.

En determinados humedales coexisten ambos fenómenos, como es el caso de la charca salina de *La Cárcaba* (con “b”), en Llano de Olmedo (n.º 17 del inventario). En esta zona abundan encharcamientos de alta salinidad sobre un sustrato constituido por una alternancia de niveles finos de arcillas y margas de permeabilidad muy baja, y lentes calcáreas de 0,2 a 2,5 m de espesor, típicas de la *Subfacies Arcillosas de Coca*. La alta salinidad está originada por flujos profundos lentos, disolución de minerales solubles y fenómenos de pseudomorfosis de yeso en calcita.

De este modo, las características químicas de las aguas están determinadas en gran medida por la distancia al borde del acuífero y el funcionamiento del mismo.

El parámetro “*máxima longitud de flujo*” es un indicador del tiempo de residencia del agua subterránea en el subsuelo, y se define como la máxima distancia existente entre el nivel más alto del acuífero y un punto determinado, medida perpendicularmente sobre un plano horizontal a los niveles piezométricos (*Rey Benayas, 1991*).

La **cartografía hidrogeológica a escala regional**, extraída de los antecedentes bibliográficos (*MIMAM, 2001*), ha permitido realizar medidas en puntos de agua situados en el borde del acuífero y puntos en la zona de ascenso, situados en facies terciarias (Ciruelos de Coca). La diferencia del nivel del agua para el acuífero regional oscila entre 20 y 30 metros en una distancia que, medida en el sentido de las líneas de flujo, asciende a 30-35 km entre esta localidad y el borde del acuífero. El gradiente hidráulico, por tanto, es ligeramente inferior al 2 ‰.

La presencia de humedales de salinidad intermedia en la zona centrooccidental de la *Cubeta* parece corresponder a trayectorias ascendentes del flujo intermedio de aguas mineralizadas y algo evolucionadas, casuística que aparece, por ejemplo, en las inmediaciones de Ciruelos de Coca, sobre un sustrato terciario, donde aparecen humedales salinos que no son humedales endorreicos puros, como es el caso de la Laguna de la Iglesia, o de algunos aparatos asociados a la laguna de las Eras.

Como criterio de **detección de flujos ascendentes** se ha estudiado la diferencia en el nivel del agua entre pozos salinos y humedales que se encuentren a escasa distancia. Según algunos autores puede darse el caso de niveles de agua en pozos situados a escasos centímetros por encima del nivel medio del agua en humedales del acuífero de Los Arenales (*Rey Benayas, 1991*).

Analizando este criterio en todos los humedales del sistema, se ha detectado exclusivamente en dos pozos excavados en Ciruelos de Coca, muy cerca de humedales salinos. Estos pozos presentaban el brocal impermeable, y su nivel del agua quedaba por encima del nivel freático del humedal.

En las figuras siguientes se presentan los dos ejemplos citados, observados en febrero de 2002 y agosto de 2003 (Figs. 4.23 y 4.24).





Figs. 4.23) y 4.24). Situación indicadora de flujos salinos ascendentes. El nivel del agua del pozo (salino) se encuentra por encima del nivel del agua del humedal, de quimismo similar. Humedales n.º 45 (9 de febrero de 2002) y n.º 46 del inventario (7 de agosto de 2003).

La técnica para estudiar la evolución de la salinidad con el tiempo de residencia del agua en el acuífero puede ser tratada por técnicas hidrogeoquímicas convencionales, como son las matrices de correlación o la determinación de la “*chi cuadrado*” al tratarse de una variable regionalizada estocástica, o bien por técnicas más simples y operativas.

Entre éstas cabe destacar la correlación paramétrica simple entre dos variables cuantitativas: la salinidad y la distancia recorrida o bien el tiempo de residencia.

Este método resulta de especial relevancia para el diseño de técnicas tendentes a conseguir una calidad de las aguas similar a la de los humedales, a partir de las aguas de recarga procedentes de cauces fluviales.

Consecuentemente la longitud de flujo de las aguas subterráneas y su tiempo de residencia en el acuífero a lo largo de las trayectorias de flujo tiene consecuencias en el quimismo y estructura del suelo, en las comunidades vegetales y hábitats en general de descargas de acuíferos, y es el principal factor que condiciona las características de los humedales (*Rey Benayas, 1991*).

– **Caracterización de los suelos.** Los procesos de interacción agua-suelo y las condiciones medioambientales condicionan la edafogénesis. En los apartados “*interacción agua-suelo*” y “*caracterización de las aguas del acuífero*” se presentan los rasgos diferenciadores de las aguas subterráneas con respecto a las aguas de la *Cubeta*.

Con los datos de análisis de aguas disponibles de algunos de los humedales de la *Cubeta* se ha realizado la carga en un modelo geoquímico tipo WATEQ, deduciendo así las fases minerales presentes en el sistema, que con mayor probabilidad han condicionado el quimismo de sus aguas.

A partir del análisis de aguas completo del humedal “*Los Majuelos*”, n.º 19 del inventario, las aguas son clorurada y sulfatada sódica y potásica. El resultado del cálculo desvela la presencia de las fases minerales tipo halita, silvita y anhidrita, junto con una fuente de sílice importante (cuarzo o feldespatos).

En análisis del humedal n.º 46 del inventario y su posterior modelización indica la presencia de halita, silvita, dolomita y anhidrita en el sistema.

Como rasgos destacables en ambos cabe mencionar el alto intervalo de variabilidad en cuanto a conductividad, de 2.050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el humedal n.º 46 a 8.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el n.º 19. Este último se encuentra más alejado del borde del acuífero y a una distancia de casi 5,5 km del anterior “*aguas abajo*”, según la dirección de las líneas de flujo de las aguas subterráneas.

La concentración de nitratos en las aguas también oscila entre límites anchos. Mientras en el primero de los humedales, situado ligeramente más alto que los cultivos de los alrededores, la concentración en nitratos es muy baja (2,5 mg/l en el humedal 19 de Llano de olmedo), así como la de amonio (0,33 ppm), en el humedal 46 asciende a 126 mg/l. Estas cifras entran en consonancia con la concentración de carbonatos en el sistema, que es de 0 y 318 ppm en el mismo orden. Este hecho es indicativo de un ambiente reductor puntual en el humedal más alejado de los regadíos y de la presencia de reacciones de desnitrificación y alcalinización en las aguas más salinizadas. En estos ambientes es previsible hallar metano disuelto en las aguas (*Bubier & Moore, 1994*).

También resulta relevante la alta influencia de las zonas regables en la concentración de nitratos, que alcanza concentraciones muy altas.

El sodio también oscila entre límites anchos, aumentando con el período de residencia. En las muestras analizadas la concentración es de 112 y 970 ppm, respectivamente de sur a norte.

Otro hecho relevante es la elevada concentración de sílice en el sistema, a pesar de ser humedales desarrollados sobre facies Cuestas. La escasez de sílice en el suelo induce a pensar que se trata de sílice originaria de los primeros estadios de envejecimiento de este agua.

Se ha realizado un análisis químico de suelos de dos muestras superficiales del cuenco de la *Laguna de la Iglesia*, en Villagonzalo de Coca (n.º inv. 56) y *Caballo Alba* en Villeguillo (n.º 40).

La conductividad del extracto saturado oscila entre 1.500⁴ y 2.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el pH es muy básico (9 y 9,5 respectivamente), lo que resalta la baja acidez del medio. La abundancia de iones alcalinos es alta con respecto a los alcalinotérreos, y el porcentaje de potasio es muy alto. Cabe destacar además una presencia de materia orgánica oxidable entre 0,5 y 1 % y de fósforo cercana a 20 ppm. El nitrógeno total en el suelo es de 0,1 y 0,05 ppm.

El análisis granulométrico desvela la baja proporción de partículas tamaño arena (de 5 a 15 %) y alta de arcillas (en torno al 68 %), confirmando la baja acidez del sustrato y el origen ancestral del sílice en las aguas.

Las variables químicas del suelo muestran tres tendencias principales en su mineralización: “salinidad edáfica”, “alcalinidad edáfica” y “halita del suelo” (*Calderón, 1895*). Las dos primeras tendencias son “paralelas” a las dos primeras tendencias de variación de las características químicas del agua subterránea (mineralización global y mineralización por envejecimiento o alcalinización). La halita en el suelo correspondería a un estadio posterior de la segunda tendencia.

La primera tendencia puede ser considerada el resultado de la segunda tendencia más una mineralización por disolución de evaporitas, que termina por precipitar halita y silvita.

Los valores elevados de la primera tendencia corresponden a los suelos salinos o *solonchacks* en áreas de descarga regional, mientras que la segunda tendencia se asocia a los suelos alcalinos o *solonetz* (*Calderón, 1895*).

En la siguiente figura se aprecia un perfil tipo de los distintos horizontes superpuestos (Fig. 4.25):

⁴ El mismo parámetro fue determinado en 1990 en los laboratorios del IGME, resultando un valor de 2.120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (en Rey Benayas, 1991, anexo 7). en todos los humedales del complejo analizados, el valor de C nunca excedía de 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en ese período).



Fig. 4.25. Pozo-charca excavado entre Ciruelos de Coca y Villeguillo, que refleja los distintos niveles mencionados del solonchacks: Tapiz arenoso eólico mezclado con turba y sales, estrato salino con precipitación de halita, silvita y anhidrita y estrato margoso de alta alcalinidad edáfica.

La disponibilidad de datos de analítica es muy limitada. En total se cuenta con dos análisis de suelos, dos análisis de aguas y la determinación de parámetros inestables en ocho humedales (los que presentaban lámina de agua en los veranos de 2002 y 2003, época de inventariado). La distribución de esta información se presenta en la figura 4.26, donde se percibe la zonificación de los datos disponibles.

Las “*fichas de caracterización*” de los análisis químicos disponibles se presentan en el anexo 4.3.

En dicho anexo figuran los resultados del análisis químico de los suelos en el cuenco de las lagunas en los humedales de la Iglesia y de Caballo Alba, así como los análisis químicos de las aguas de los humedales de los Majuelos y Ciruelos. El orden de presentación de los parámetros es similar al descrito y empleado en el Bloque 3.

La escasez de análisis de muestras de aguas dificulta la aplicación de otras técnicas hidroquímicas basadas en análisis de poblaciones, lo que constituye un factor limitante para asegurar la fiabilidad de las observaciones obtenidas.

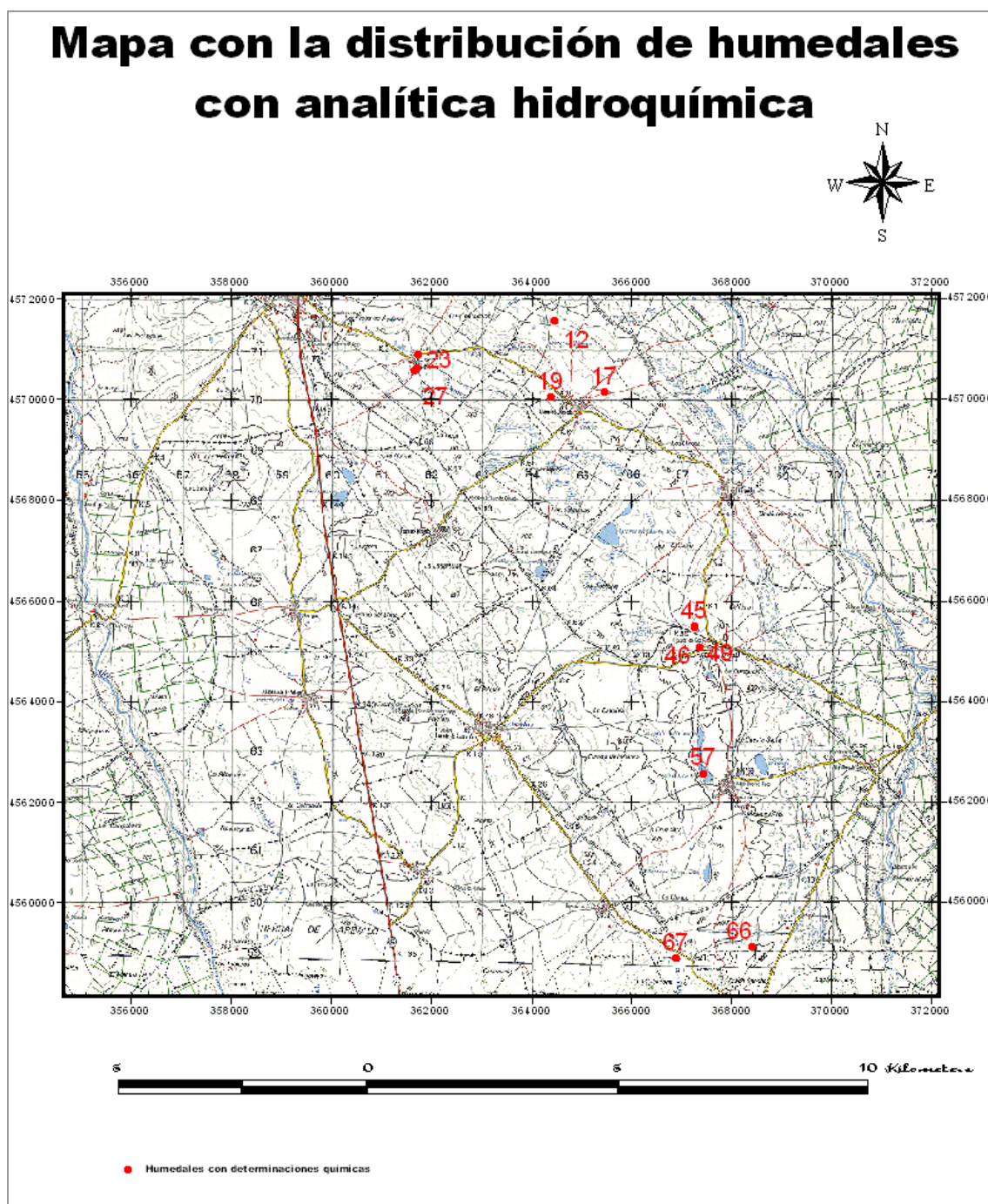


Fig. 4.26. Mapa donde consta la distribución de los humedales con datos de análisis de aguas (n.ºs 19 y 46) y determinación de parámetros inestables (n.ºs 12, 17, 19, 23, 27, 28, 45, 46, 49, 57, 66 y 67). Escala aproximada de la cartografía, 1:100.000. Mapa de fondo, cartografía del IGN a escala 1:25.000.

A tenor de estas observaciones, parece existir una correlación significativa entre la longitud del flujo y la mayoría de las variables hidrogeoquímicas, destacando aquellas que denotan el envejecimiento del agua subterránea, como son la mineralización global, salinidad, conductividad y concentración de sodio.

Los datos obtenidos confirman las observaciones deducidas de trabajos realizados en la totalidad del acuífero de Los Arenales, con mayor cantidad de análisis. Éstos hablan de dos tendencias de variación de las características químicas del agua

subterránea. La primera tendencia, muy relacionada con la conductividad y los “iones fuertes” (SO_4^- , Cl^- , Na^+), son interpretados como un factor de “*mineralización global*” de las aguas. La segunda tendencia está relacionada con el pH y carbonatos, es la “*alcalinización*” o “*mineralización por envejecimiento*”.

La concentración de carbonatos en los humedales del Complejo Coca-Olmedo es elevada al descargar en él sistemas de flujo.

Todos estos aspectos llevan a dar peso y validez a la hipótesis de *Rey Benayas, 1991*, según la cual el “*Complejo lagunar Coca-Olmedo*” ha sido generado a partir de sistemas de flujo de aguas subterráneas intermedios y profundos o *subregionales*, dotando a las lagunas de una alta salinidad.

La *fuerza* de la componente vertical ascendente de los flujos subregionales en el área de descarga conlleva el transporte advectivo y disuelto de materiales en el agua, lo que resalta el papel modelador de las aguas subterráneas en el *Complejo*.

De acuerdo con los resultados obtenidos, existen relaciones estadísticas muy significativas entre la mayoría de las concentraciones y parámetros medidos en el agua subterránea y en el suelo, salvo para los iones K^+ y Cl^- , cuando son relacionados con la longitud del flujo del agua subterránea y el tiempo de residencia del agua en el acuífero.



Fig. 4.27. Bodón de la Hiruela (n.º 66), en Santiuste de San J&B. El análisis de sus aguas indica una concentración en nitratos superior a 100 ppm en agosto de 2003, en plena época de riegos.

5.4.3. Caracterización ecológica

Los factores genéticos más importantes que constituyen los hábitats de descarga de aguas subterráneas son los hidrogeológicos, climáticos y topográficos. Todos estos elementos guardan una estrecha interrelación y condicionan la estructura de las comunidades vegetales y hábitats de las zonas de descarga.

Mientras que en las áreas de recarga dominan los cultivos y la vegetación xerofítica que impone la sequedad climática, en las de descarga se ha originado una mayor biodiversidad y un espacio ecológico más desarrollado, constituido por varios subsistemas.

Se ha realizado una caracterización ecológica de las distintas orlas perimetrales o subsistemas de un bodón tipo, con objeto de determinar su organización ecológica, que se presentan en la figura adjunta (Fig. 4.28):

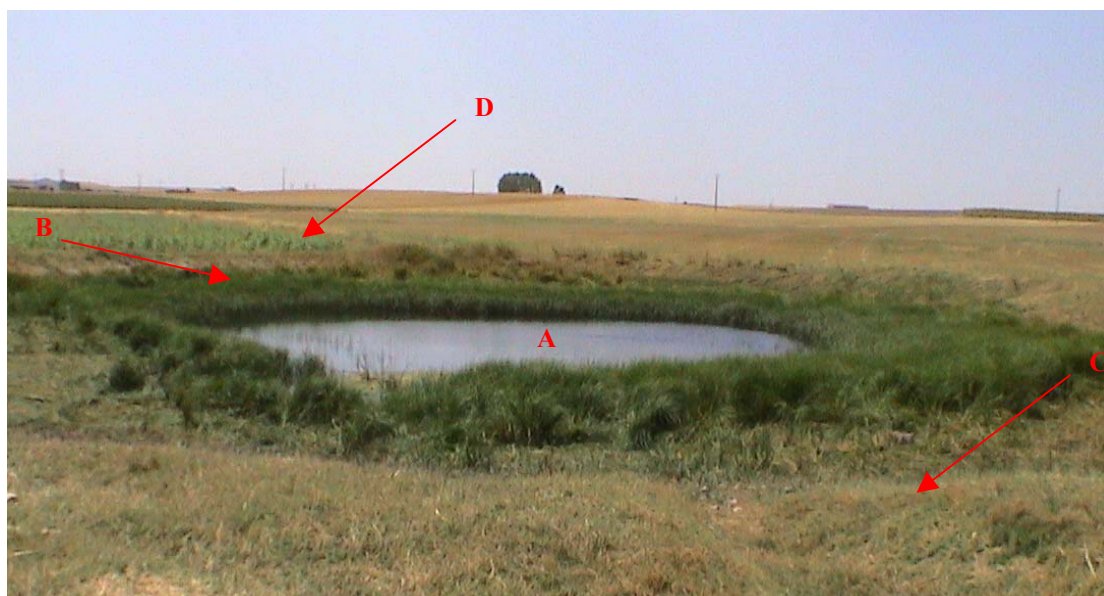


Fig. 4.28. Bodón de la Hiruela, en Santiuste de San Juan Bautista (n.º 66 del inventario). Subsistemas dentro del ecosistema lagunar: A) Laguna; B) Playa o litoral; C) Zona de Influencia en la cuenca de recepción y D) Cultivos.

Los subsistemas diferenciados son los siguientes:

- A).- Laguna, propiamente dicha.
- B).- Playa o litoral.
- C).- Zona de influencia o área perilagunar.
- D).- Cultivos (Unidad Ambiental).

A). Laguna



En la laguna propiamente dicha o masa de agua, la biota está condicionada por la calidad de las aguas, y viceversa: “La composición del agua es el resultado de una serie de procesos externos y de equilibrios internos” (*Margalef, 1992*).

La luz es la fuente de energía inicial que pone en marcha todos los procesos biogeoquímicos que dan sentido al ecosistema acuático (*Horne & Golman, 1994*). Los humedales son, por su escasa profundidad, medios bien iluminados en los que la luz no es el factor limitante, y ésta es una de las razones de su elevada productividad. Sin embargo, al ser masas de agua de escaso volumen y en estrecho contacto con el medio terrestre, puede darse una abundante presencia de partículas en suspensión procedentes de la cuenca vertiente, o bien, al ser muy productivos, pueden tener una densidad elevada de organismos planctónicos, generalmente de algas unicelulares, caso frecuente en los bodones de elevada salinidad y con una lámina de agua permanente.

Los procesos externos determinan la elevada concentración de sales (Cl Na y Cl K, principalmente), y la actividad de los organismos que viven en el agua contribuye a los equilibrios internos. La concentración de nutrientes es determinada en gran medida por esta actividad y por los aprovechamientos agrícolas de la Unidad Ambiental “cultivos”, fuente importante de nutrientes. La presencia de fosfatos en las aguas es limitada (20 y 21 ppm en los análisis del extracto saturado del cuenco), dada la elevada concentración de calcio, regulador del fósforo en solución. En estas condiciones el fósforo es el factor limitante, por lo que la producción primaria es baja (*CMA JA, 2001*).

En gran parte de estos bodones hipersalinos sólo pueden desarrollarse aquellos organismos que toleren estas condiciones extremas de salinidad, por tanto, esta hipersalinidad condiciona de un modo sustancial la vida en la laguna.

La escasa profundidad impide que se genere una estratificación significativa, de forma que raramente puede haber condiciones anóxicas en las capas menos superficiales del agua.

El oxígeno disuelto favorece la oxidación de fases inestables reducidas, propiciando la génesis de nitrato, sin que haya una desnitrificación bacteriana importante, por lo que el nitrato permanece en disolución. Esta es una de las razones para establecer un perímetro de protección suficiente entre la laguna y las áreas de cultivo en los humedales más significativos que sean protegidos de forma efectiva y no teórica. De este modo se minimiza la entrada de nitratos procedentes de los fertilizantes.

En caso de humedales con procesos hidroquímicos alcalinizantes y reductores en sus aguas predominan procesos de desnitrificación y carbonatación, con el subsiguiente incremento de la alcalinidad. La alcalinidad favorece la descomposición de la materia orgánica que llega a la laguna procedente de los cultivos del entorno, de la propia vegetación y fauna de la laguna y de su entorno inmediato, lo que implica el desarrollo de organismos en el fango, que constituirán la base alimenticia de animales superiores, especialmente aves.

En humedales de baja salinidad se han instalado varias especies hidrófilas, como son las algas, los nenúfares (*Nuphar sp.*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*)

En los bordes de la lámina de agua y temporalmente en su interior sobresalen los gruesos tallos del junco de laguna (*Scirpus lacustris* L.), los penaches de los carrizos (*Phragmites communis* L.) y, en las aguas más estancadas, las espadañas o bayones (*Typha* sp.).

La primera franja perilagunar corresponde con el transepto de especies subhalófitas y alcalinófitas, asociadas a zonas de descarga de sistemas de flujos intermedios (Rey Benayas, 1991). Según este autor y en la fecha de inventario reseñada, las especies inventariadas e indicadoras de esta franja del perfil son las siguientes (*sic*): *Alopecurus geniculatus*, *Deschampsia cespitosa* subsp. *refracta*, *Rumex conglomerata*, *Festuca arundinacea* subsp. *fenas*, *Juncus acutus*, *Juncus gerarsi*, *Scirpus maritimus* subsp. *compactus*.

La franja perilagunar en los humedales salinos, en general los más meridionales del *Complejo*, está ocupada por especies halófitas asociadas a aguas subterráneas muy mineralizadas y envejecidas, como son: *Aerulopus littoralis*, *Artemisia caerulea*, *Convolvulus lineatus*, *Frankenia lavéis*, *Juncus maritimus*, *Juncus subulatus*, *Limonium costae* y *Suaeda vera* (Rivas, 1986; Rey Benayas, 1991; Rey Benayas et al, 1999).

Entre los invertebrados que habitan en la laguna destacan los macroinvertebrados crustáceos *Arctodiaptomus salinus* y *Cletocamptus retrogressus*, que, como se indicó anteriormente, soportan altas concentraciones de salinidad y de cloro especialmente.

En cuanto a la avifauna, se ha detectado la presencia de algunas especies acuáticas en las principales lagunas del *Complejo* por extensión, lámina de agua permanente y desarrollo de una zona de playa extensa. Entre las especies observadas cabe destacar al zampullín chico (*Podiceps ruficollis*), garza real (*Ardea cinerea*), ánade real (*Anas platyrhynchos*), ánade silbón (*Anas penelope*), pato cuchara (*Anas clypeata*), cerceta común (*Anas crecca*), ánade rabudo (*Anas acuta*), tarro blanco (*Tadorna tadorna*), pato colorado (*Netta rufina*), polla de agua (*Gallinula chloropus*), focha común (*Fulica atra*), cigüeñuela (*Himantopus himantopus*) y avefría (*Vanellus vanellus*), así como el reposo ocasional del ganso o ánsar común (*Anser anser*). Este inventario, realizado en el transcurso de la tesis doctoral entre 1999 y 2004 no tiene carácter exhaustivo.

En primavera y verano se advierte el vuelo multicolor de abejarucos (*Merops apiaster*) y oropéndolas (*Oriolus oriolus*) procedentes del norte de África. Estas aves comparten espacio con varias especies de pequeños pájaros insectívoros, que se alimentan entre la tupida vegetación de charcas y lagunas; humedales donde existen los anfibios (ranas) y, como depredadoras superficiales, la culebra de agua (*Natrix natrix*).

B). Litoral o Playa

El litoral o playa es un medio de alto dinamismo, tanto por su extensión y límites como por sus características ecológicas. La playa se sitúa entre la banda donde comienza el desarrollo de las plantas halófilas (toleran concentraciones altas de sal en el suelo y en las aguas), y la línea mínima que alcanzan las aguas de la laguna (obviando que en largos periodos del año los bodones y lagunas permanecen secos, e incluso en ciclos interanuales).



La principal variable ecológica es la humedad edáfica. La vegetación característica es variable, dependiendo de si son bodones con abundancia de carbonatos y procesos reductores u oxidantes, si bien se aprecia una serie de especies comunes, tales como el carrizo, las tifas o enneas, el rumex, etc. En los humedales más desarrollados en los que la vegetación cobra cierta altura, como puede ser la Cárcaba en Llano de Olmedo, crían algunas de las aves señaladas en el apartado anterior. También se ha constatado, aunque de forma ocasional y muy puntual, la presencia de las aves limnícolas en zonas más descubiertas, sin vegetación.

En la orla perilagunar de ciertos bodones, como la Crijota, la Liebre o de la Vega hay plantas halófilas y otras más propias de ambientes de agua dulce (vegetación hidrófila) que rodean la laguna en más de un cinturón, y que caracterizan tanto a la zona de playa como a la zona periférica de protección.

La vegetación halófila se sitúa junto a las orillas de la laguna donde la salinidad edáfica es mayor. La vegetación hidrofílica está compuesta principalmente por *Phragmites australis* (carrizo) y *Scirpus holoschoenus* (junco), con otras especies, como *Juncus sp.* y *Typha domingensis* (enea). Se presentan en bandas de escasos metros de anchura, y en general alta degradación asociadas al cinturón de eflorescencias salinas.

El gradiente de halofitismo de la vegetación está bien correlacionado con las características del agua subterránea y del suelo, destacando la longitud del flujo y la mineralización global de las aguas, especialmente en cuanto a concentración de cloruros e iones alcalinos se refiere (Rey Benayas, 1991).

C). Zona Periférica de Protección

La zona *perimetral de protección* se corresponde con la cuenca de recepción de cada laguna, ya que en general se ubican en depresiones endorreicas o semiendorreicas. Esta zona tiene fundamentalmente una función de protección frente a los arrastres que podían ocasionar las grandes avenidas o las entradas masivas de contaminantes nitrogenados y metales pesados procedentes de las áreas agrícolas. La presión agrícola ha reducido esta franja, alcanzando muy bajas dimensiones en varios humedales, como puede ser el *Bodón de la Liebre* en Aguasal (n.º 7), ya que el cultivo de girasol alcanza incluso la zona de litoral.

Esta zona de carácter salino de los suelos con ocasional erosión del horizonte A se conoce como salguero, y presenta eflorescencias bien en un cinturón o bien desconectadas en manchas blancas y grises de sal en el sustrato. En conjunto constituyen los “prados salinos.” En ocasiones hay especies adaptadas a la salinidad, como los tarays (*Tamarix canariensis*) y otras especies más comunes en lugares salinos, como *Suaeda splendens*, *Salicornia europea*, *Chenopodium cf. quenopodialis* y *Kickxia cf. Spuria* (inventario propio con ayuda de dos asesoras en botánica).

En el área que rodea a las lagunas la fauna característica es la compuesta por especies cinegéticas, tan comunes en este tipo de paisajes semiáridos de matorral bajo y cultivos, el conejo (*Oryctolagus cuniculus*), la perdiz roja (*Alectoris rufa*), el zorro (*Vulpes vulpes*), etc. (inventario propio).

La distribución de las especies vegetales en los distintos subsistemas está determinada por el grado de halofitismo de la vegetación, que a su vez está determinado por las características del agua subterránea y del suelo, que a su vez dependen de la longitud del flujo, la mineralización global, la conductividad, presencia de iones alcalinos y cloro, etc.

Con respecto a este inventario inicial, la forestación y el regadío ha traído como consecuencia la aparición de especies alienígenas nitrófilas, asociados a sistemas de flujo superficiales (*Hammers, 1986*).

Las plantas nitrófilas, es decir, aquellas que prefieren suelos más enriquecidos en nutrientes. Son especies tendentes a zonas de alta humedad y sombra con continuo aporte de materia orgánica. Las zonas regables con abundancia de abonado favorecen la germinación y la instalación de comunidades nitrófilas, así como los espacios aluviales. Su presencia se ve incrementada cuando se realizan movimientos de tierra, talas o cualquier otro tipo de alteración del medio.

Las especies inventariadas en la zona de estudio son:

- Achicoria: *Crepis versicaria*, *Cochorium intybus*, *Chodrilla juncea*, *Aconitum napellus*, *Hypochoeris radicata*, *Lactua serriola*, *Taraxacum officinale*, *T. Obovatum*, *Vicia hirsuta*.
- Amargosa: *Centaureum erythraea*
- Avena loca: *A. fatua*.
- Bledo o quelite: *Amaranthus spp.* *Atriplex ssp.*, *Chenopodium ssp.*
- Caléndulas: *Calendula arvensis* L.
- Cardo: *Cirsium arvense*
- Cardo mariano: *Silybum marianum*
- Cardo del diablo: *Centaurea solstitialis*
- Cebadilla: *Bromus sterilis*, *Hordeum hystrix*, *H. marinum*, *H. murinum*, *H. secalinum*, *Setaria verticillata*, *Pallenis spinosa*.
- Cerrajas: *Sonchus asper*, *Andryala integrifolia*.
- Cizaña: *Avena alba*, *A. barbata*.
- Coquillo: *Cyperus spp.*
- Correhuela o gloria de la mañana: *Convulvulus arvensis*
- Diente de león: *Taraxacum officinale*
- Equiseos: *Equisetum ssp.*
- Gallitos: *Lamium amplexicaule*, *Papver rhoeas*, *Rhinanthus minor*.
- Grama: *Cynodon dactylon*
- Hierba de las golondrinas: *Chelidonium majus*
- Jaramago: *Sisymbrium officinale*, *Diplotaxis ssp.*
- Lechuguilla: *Sonchus oleraceus*
- Lengua de vaca: *Rumex spp.*
- Lengua de culebra: *Anchusa italica*, *A. arvensis*
- Llantenes: *Baldellia ranunculoides*, *Alisma lanceolatum*, *A. plantago-aquatica*, *Plantago lanceolata*, *P. major*, *P. maritima*, *P. media*, *P. sempervirens*, *P. subulata*, *P. coronopus*, *P. lagopus*, *P. afra*, *Littorella uniflora*.
- Magarzón: *Anacyclus clavatus*.
- Malva: *Malva parvinflora*

- Mastuerzos: *Cardamine hirsuta*, *C. pratensis*, *Hornungia petraea*, *Coronopus squamatus*, *Cardaria draba*, *Descurainia sophia*, *Hymenolobus procumbens*, *Lepidium campestre*, *L. graminifolium*, *L. hirtum*, *L. latifolium*, *Lobularia maritima*, *Tordylium maximum*, *Mentha longifolia*, *Ridolfia segetum*, *Rorippa nasturtium-aquaticum*, *R. sylvestris*.
- Mirabel: *Prunus domestica*.
- Mosquera: *Galium verum*, *Ophrys apifera*
- Ortiga: *Urtica* spp.
- Pepinillo del diablo: *Echallium elaterum*
- Rábano silvestre: *Raphanus raphanistrum*
- Trébol: *Trifolium* spp.
- Viborera: *Echium vulgare*, *E. asperrinum*, *E. plantagineum*, *Aristolochia paucinervis*.
- Zanahoria silvestre: *Daucus carota*.
- Zurrón de pastor: *Capsella bursa-pastoris*

Cerca del caz de recarga artificial y en terrenos muy húmedos o con frecuentes inundaciones por recarga artificial aparece el carrucho (*Arctium minus*, *Xanthium spinosum*).

Estas especies aparecen con frecuencia asociadas en “*comunidades nitrófilas*”, destacando por su presencia en el área de estudio las siguientes reseñas:

- Plantas herbáceas trepadoras que se encaraman a los zarzales y cañaverales sobre suelos profundos y húmedos. Tiene su óptimo al final del estío: *Calystegia sepium*, *Cynanchum acutum*, *Humulus lupulus* y *Bryonia dioica*.
- Asociación especializada en suelos profundos y húmedos, con aportación de nutrientes más o menos constante. Aparecen en las orlas perilagunares: *Sambucus ebulus* y *Urtica dioica*.
- Comunidades formadas por grandes terófitos y especies típicas de terrenos arados y ricos en sustancias nitrogenadas: *Onopordum acanthium*, *Onopordum nervosum*, *Centaurea calcitrapa*, *Cirsium vulgare*, *Eryngium campestre*, *Lactuca serriola*, *Silybum marianum*, *Carduus tenuiflorus*, *Carduus pycnocephalus*, *Carlina corymbosa*, *Carthamus lanatus*, *Scolymus hispanicus*, *Chondrilla juncea* y *Mantisalca salmantica*.

Cuando se generan prados húmedos son intensamente pastados durante los veranos. De ahí gran parte de los problemas de eutrofización de los humedales y de que sus entornos tengan en gran medida vegetación herbácea ruderal, donde se mezclan varias especies de familias de las ciperáceas (*Carex* sp.), rosáceas (*Potentilla* sp.), gramíneas, leguminosas, etc.

D). Cultivos y pinares

Los cultivos y pinares han sido considerados Unidades Ambientales definidas y georreferenciadas, más que una parte integrante de la zonificación de un *humedal tipo*.



Los cultivos han sido llevados siempre que ha sido posible hasta la misma orilla del humedal, introduciendo especies nitrófilas que con frecuencia han desplazado a la vegetación indígena de la *zona periférica de protección*.

Una vez caracterizados los humedales del sistema mediante parámetros específicos, y conocidos los rasgos comunes de los humedales del *Complejo*, se cuenta con un conocimiento del estado preoperacional suficientemente amplio para su clasificación y aplicación de criterios de ingeniería ambiental. Con ellos se pretende diseñar un sistema de indicadores medioambientales específico, que permiten conocer la respuesta de cada especie a las variables del agua subterránea y suelo de los humedales, así como la respuesta ante las variaciones de los factores ecológicos que influyen más en la composición de las comunidades vegetales, que son la salinidad del agua subterránea y del suelo.

Unos posibles indicadores podrían estar basados en “*perfiles de frecuencias corregidas*” y en “*parámetros de información mutua especie-factor*”, o bien de “*grupos de especies-factor*”, estableciendo previamente categorías de asociaciones de plantas glicófilas, alcalinófilas, halófilas, calcícolas, etc.

5.5. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los humedales en la zona de estudio y en general, pueden ser clasificados de acuerdo con varios criterios. En este apartado se presentan los más habituales, como etapa previa a la proposición de una nueva clasificación genética-funcional que permita estudiar la idoneidad de conectar los humedales con las labores de AR como técnica para su regeneración hídrica.

En el desarrollo de este trabajo se ha adoptado la definición de humedal establecida por el *US Fish and Wildlife Service (Matter & Mannan, 1988)* por considerarse adecuada para los fines previstos, ya que tiene en especial consideración la fluctuación de la lámina de agua, principal elemento de control durante las operaciones de recarga artificial de acuíferos (AR).

“Los humedales son tierras en transición entre los sistemas acuáticos y los terrestres donde la capa freática está habitualmente al mismo nivel o cerca de la superficie, o bien el terreno está cubierto por aguas poco profundas. Los humedales deben tener uno o más de los siguientes atributos:

- *Al menos periódicamente, el terreno ha de mantener predominantemente una vegetación de plantas hidrófilas.*
- *El sustrato debe ser predominantemente un suelo hidromorfo no drenado.*
- *El sustrato está cubierto por aguas poco profundas alguna vez durante la estación más productiva del año.”*

La definición, además de la presencia o ausencia de una lámina de agua, considera otros factores adicionales, como son la presencia de vegetación y de suelos hidromorfos.

Otras clasificaciones tenidas en cuenta como criterios para la caracterización de los humedales del *Complejo* se basan en su génesis, dependencia de los acuíferos, grado de antropización, geomorfología, funcionamiento, etc. Veamos desglosadamente estos criterios.

5.5.1. Clasificación genética

La génesis de humedales sobre arenas eólicas se produce de manera ocasional cuando concurren varios factores, como son la rápida infiltración de las aguas en el sustrato y la inexistencia de una franja capilar.

Generalmente se originan en los siguientes contextos:

- Asociados a megadunas (humedales glicofíticos).
- En forma de rezumes asociados a contactos con materiales terciarios (caso habitual en el *Complejo*).



- En zonas de adelgazamiento del manto eólico, generalmente relacionado con la red de drenaje superficial. A este respecto cabe destacar que el estudio hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Bloque 2) ha desvelado la tendencia al establecimiento de ciertos arroyos, como el de la Ermita, en zonas con presencia de materiales que funcionan como acuitardo a escasa profundidad, facilitando así el drenaje del acuífero.

5.5.2. Clasificación litológica e hidroquímica

En cuanto a su litología e hidrodependencia, se ha desarrollado una clasificación específica para los humedales de la zona de estudio. *Rey Benayas, 1990*, tras un estudio realizado sobre muestras de agua subterránea, de suelos y de comunidades vegetales, así como un estudio de fotointerpretación de la zona, llevó a cabo un tratamiento estadístico de los datos, concluyendo en que se puede establecer una tipología genética y funcional de los hábitats de descarga de agua subterránea en el acuífero de Los Arenales, zona de campo de su tesis doctoral.

Los principales factores que hidrogeológicamente controlan la variación ecológica de los humedales pueden ser esencialmente de dos tipos, A) y B) (*Rey Benayas, 1992a*):

- Tipo A): Dependientes del acuífero regional:
 - A)1. Alternancia de áreas de recarga y descarga de agua subterránea.
 - A)2. Evolución química del agua subterránea a lo largo de las trayectorias de flujo regional.
- Tipo B): Heterogeneidad de la composición litológica de los materiales del acuífero:

Su caracterización conceptual está basada en el siguiente esquema (Fig. 4.29).

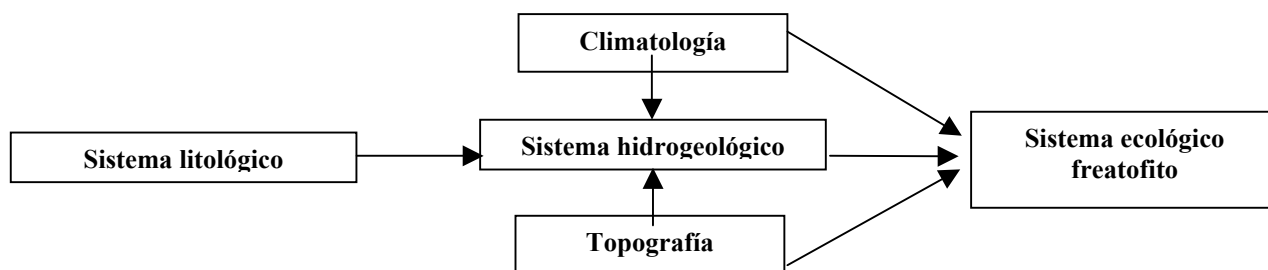


Fig. 4.29. Principales factores que controlan hidrogeológicamente la variación ecológica de los humedales.

El sistema hidrogeológico está determinado en gran medida por la hidroquímica de sus aguas, condicionadas a su vez por su tiempo de residencia en el acuífero, de acuerdo con un modelo conceptual tipo Tóth (*Tóth, 1970*), si bien el autor no alude a este término en su obra.

5.5.3. Otras clasificaciones

Una clasificación **geomorfológica** específica aplicable al *Complejo* vincula las zonas húmedas con depresiones endorreicas. Los humedales así generados han evolucionado en zonas con dificultades topográficas para evacuar la escorrentía.

La génesis de estas cubetas se debe a la interferencia de fenómenos y procesos diversos, entre los que destacan:

- Fenómenos estructurales o tectónicos que interfieren con unas determinadas litologías. Es el caso de humedales generados sobre fosas tectónicas o grabens, cuencas de hundimiento pliocuaternarias, áreas subsidentes, sinclinales, zonas de disolución de yesos, de halitas, de calizas (dolinas), etc. (*Winter, 1983*).
- Fenómenos geomorfológicos: superficies de erosión combadas, depresiones en la superficie de paramera, etc.
- Fenómenos climáticos: tienen lugar en zonas áridas con un régimen de vientos alto. Así, la deflación eólica es muy importante en la formación de *Sebkas* y *Chotts*, donde el viento erosiona e incluso excava el fondo de una depresión, evacuando las arenas y llegando hasta sustratos arcillosos. En otros casos da lugar a surcos de deflación interdunares, etc. (*Viñals, 1999*).

Existen varios criterios de clasificación por la posición relativa de las masas de agua con respecto a los sistemas de flujo. Los dos que se han considerado más destacables son los que diferencian humedales por su posición con las líneas de flujo (*Custodio, 2001*), y con la red de drenaje superficial (*García Rodríguez, 2003*), han sido descritos en el apartado 3.1.3. del Bloque 1. Dado que la mayor parte de los humedales del *Complejo* son endorreicos puros, con entrada de aguas salinizadas por su sustrato, procedentes de flujos intermedios y profundos lentos en el acuitardo terciario, no se ha considerado procedente atribuir a todos los humedales del *Complejo* una tipología.

En cuanto al grado de **antropización de los sistemas** cabe destacar la diferenciación entre zonas húmedas artificializadas y artificiales. Este grupo lo constituyen las salinas, arrozales, instalaciones de acuicultura, embalses de riego, oasis, canteras de arcilla abandonadas, etc., y, por ende, humedales dependientes de operaciones de recarga artificial.

Este tipo de humedales evolucionan escasamente, dado que mantienen su funcionalidad mediante la intervención humana. En ocasiones adquieren gran valor paisajístico y cultural.

Los humedales **artificializados** dependen de las fuentes naturales de alimentación (precipitación, aportes fluviales, por precolación, aguas subterráneas, etc.) y de la climatología del lugar. De este modo puede haber desde aguas dulces hasta aguas hipersalinas.

Su artificialidad es inducida en determinadas ocasiones por aportes artificiales, en general a través de canales artificiales, mientras que los **artificiales** precisan

aportaciones de modo sistemático, salvo en situaciones climáticas especialmente húmedas.

Su régimen de inundación puede ser: permanente, periódico, estacional o episódico, y los diversos subambientes de un mismo humedal pueden ser objeto de estos regímenes de inundación, en función de su régimen del flujo, de la climatología, del sustrato, etc. (*Viñals, 2001*).

Su drenaje se efectúa de diversas formas: efluentes, evapotranspiración, infiltración, drenajes, etc.

En base al tipo de agua, desde un punto de vista **químico**, como principal criterio diferenciador, la *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) presentó en 1992 una clasificación de humedales, diferenciando **los de agua salada y dulce**. En los del segundo tipo se diferencian humedales ribereños, lacustres y palustres (*Dugan, 1990*).

Aquellos humedales que no presentan una lámina de agua superficial, pero que reciben aportes de aguas subterráneas, este agua se convierte en el garante de la supervivencia de las especies hidrófilas, ya que el nivel freático y la franja capilar se encuentran a escasa profundidad, pudiendo ser captada por las raíces de las plantas freatofitas. En estos casos en los que el agua subterránea no aflora en superficie, pero la vegetación se mantiene, se emplea el término de **criptohumedal** (*Custodio, 2001a*).

De acuerdo con la clasificación de *Dugan*, los humedales catalogados en el *Complejo* corresponden al tipo “palustres de agua salada emergentes.” Si se consigue desarrollar actividades de AR, los humedales serían clasificados en el subgrupo: “artificiales para agricultura/ganadería, explotación de sal, urbano-industriales y áreas de almacenamiento de aguas.”

En base a los criterios de clasificación y como etapa previa al inventario y caracterización de los humedales de la zona de estudio, se considera oportuno establecer una serie de rasgos comunes a los humedales del *Complejo*.

5.6. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES CATALOGADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO. UNA NUEVA PROPUESTA

El inventario presentado en el apartado anterior ha sido realizado con la mayor exhaustividad posible en un intento de contar con una base de datos documental sobre la que poder llevar actuaciones regenerativas en un futuro, si las condiciones idóneas económicas, medioambientales y políticas fueran concurrentes en el futuro.

Las clasificaciones previas presentan un carácter específico en general, si bien se echa en falta un sistema que clasifique los humedales en cuanto a su estado de conservación y funcionamiento ante impactos ambientales, en general antrópicos. Este criterio, a juicio del autor, se considera clave para poder gestionar programas de regeneración y para la toma de decisiones.

Un criterio adicional es la idoneidad del humedal para ser restaurado mediante operaciones de recarga artificial inducida, actividad que se configura como técnica idónea para la futura regeneración hídrica del territorio.

Otro juicio añadido apunta a la necesidad de contar con un indicador de estado de los humedales referido a una fecha determinada. En el siguiente apartado se lleva a cabo una caracterización de los humedales del *Complejo* referida a una fecha determinada, recuperando parcialmente las ideas de valoración medioambiental propuestas por González Bernáldez (1988 y 89).

La caracterización representa un complemento imprescindible para la gestión de las posibles labores regenerativas futuras.

En cuanto a su funcionamiento se han establecido cuatro **tipologías** de humedales, designados por **colores** de forma arbitraria. De este modo se han asignado los siguientes colores:

- **Rojo.** Color atribuido a los humedales desaparecidos en la actualidad, detectados mediante técnicas indirectas: fotos aéreas antiguas, encuestas a ancianos, pruebas indiciales detectadas en campo, etc. Se han designado también “humedales indiciales.”
- **Naranja:** Humedal fuertemente degradado en la fecha de inventariado, de difícil recuperación al concurrir varios impactos de diversa tipología.
- **Amarillo:** Humedales asociados a la red de escorrentía superficial, en general endorreicos y no hidrodependientes⁵, es decir, su funcionamiento no está condicionado por el nivel de las aguas subterráneas, sino más bien por la red de drenaje superficial. Son humedales que pueden permanecer secos durante los períodos de sequía sin apenas perder su valor ecológico. Su recuperación es relativamente fácil, siempre que las aguas aportadas no varíen sustancialmente en cuanto a calidad se refiere.

⁵ Aunque todos los humedales son hidrodependientes, se ha empleado este término para aquellos cuyo funcionamiento está relacionado con el de los acuíferos, y se han establecido relaciones de interdependencia acuífero-humedal.

- **Azul:** Color asignado a los humedales hidrodépendientes, es decir, cuyo funcionamiento está altamente condicionado por el nivel de las aguas subterráneas. Su recuperación resulta más complicada que en el caso anterior, ya que requieren una modificación cualitativa del agua de recarga, empleando técnicas de inducción forzada a los procesos de interacción agua-suelo.

AZUL	Humedal hidrodépendiente.
AMARILLO	Humedal asociado a la red de escorrentía superficial no hidrodépendiente/endorreico.
NARANJA	Humedal fuertemente degradado de difícil recuperación.
ROJO	Humedal indicial desaparecido. Encuestas, etc.

Dada la importancia de la presencia de agua en este sistema clasificatorio, cada color debe ir acompañado de un **índice** relativo a la presencia de agua en una fecha determinada y de cultivos alrededor.

La presencia de agua está condicionada en gran medida por la fecha de realización del inventario y el carácter del año hidrológico, no obstante las labores regenerativas se plantean para humedales que han perdido su valor por detracciones de su fuente de alimentación natural (regadíos, drenajes, derivaciones de arroyos, canalizaciones, etc.), no por ausencia de precipitaciones durante un período seco.

La presencia de cultivos alrededor es un criterio de obligada consideración, dado que el sistema ha sido diseñado para un entorno en el que la agricultura es la actividad principal. Influye además en la calidad de las aguas del humedal, dado el retorno de aguas de riego cargadas de fertilizantes, etc.

Los pesos asignados a cada tipología de humedal se basan en los siguientes criterios:

- 1). *Ausencia de lámina de agua durante la mayor parte del año.* Afectada sustancialmente. El humedal y su zona periférica han sido sometidos a cambios de uso.
- 2). *Ausencia de lámina de agua.* La afección es sustancial. Impactos derivados de la roturación, drenaje, cultivos son frecuentes.
- 3). *Ausencia generalizada de lámina de agua.* La afección es notable, no obstante su recuperación es factible aumentando las entradas de agua al sistema y corrigiendo ciertos impactos significativos adicionales, como puede ser drenajes o usos indebidos puntuales. Presenta cultivos alrededor.
- 4). *Ausencia de lámina de agua.* Posibilidad de recuperación abordable aumentando las entradas de agua al sistema. Los impactos ambientales adicionales son de escasa intensidad y magnitud. No hay cultivos en su orla perimetral ni zona de influencia. Su calidad hidroquímica está menos condicionada por el abonado de las zonas regables.
- 5). *Presencia de lámina de agua prácticamente todo el año.* Sin cultivos alrededor. La calidad de sus aguas ha variado entre límites estrechos. Posibilidades de mejora e idoneidad para implantar perímetros de protección, aplicar figuras de protección, etc. con objeto de salvaguardar su estado actual y evitar su posible deterioro.

La cartografía adjunta (Fig. 4.30) corresponde a la distribución de los humedales inventariados y su atribución a una tipología de acuerdo con el criterio propuesto relativo a su estado de conservación y funcionamiento. Los humedales han sido representados como puntos. En color punteado gris se muestran los afloramientos de arenas (facies Arévalo) y en gris los de margas y arcillas (facies Cuestas). Se ha añadido además la red fluvial. El fondo corresponde a la ortoimagen en color del año 2000. Escala 1:150.000. Esta misma base es la empleada en el mapa de la figura 4.31, donde los humedales han sido digitalizados como polígonos.

Fig. 4.30. Distribución de los humedales inventariados y tipo de acuerdo con su estado de conservación y funcionamiento. Escala 1:150.000.

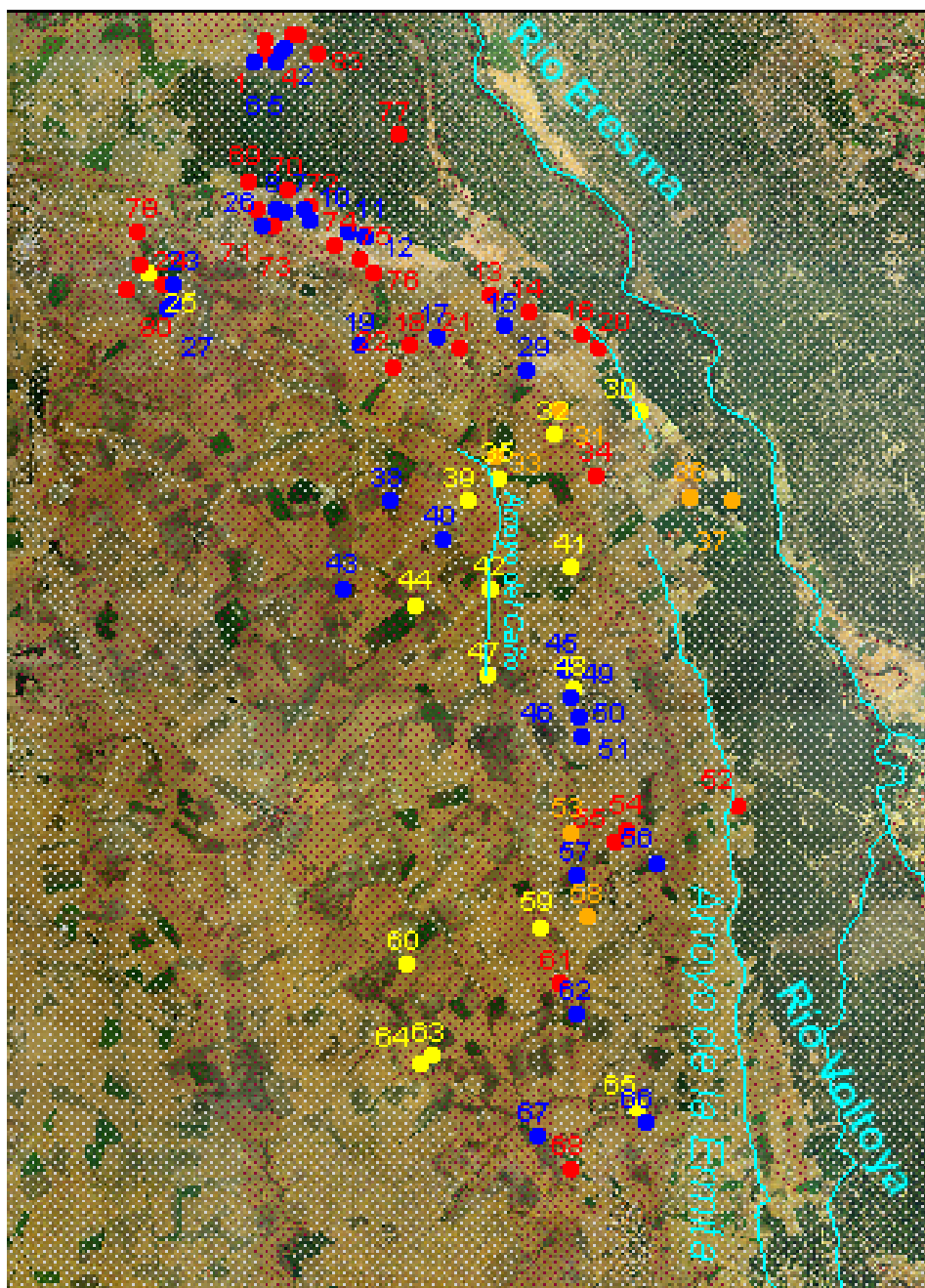


Fig. 4.30. Distribución de los humedales inventariados y tipo de acuerdo con su estado de conservación y funcionamiento. Escala 1:150.000. Estas tipologías son especificadas en la tabla del anexo 2.1.

Los humedales de tipo 1 y 2 corresponden a humedales “*indiciales*” en muchos casos. Sus técnicas de detección son diversas, prevaleciendo en general la composición química de sus suelos, salvo en los humedales asociados a la hidrología superficial, cuyo índice de preservación es variable.

Los de tipo 4 y 5 corresponden a humedales que conservan características propias de tales.

Aunque el sistema de asignar pesos da una alta cabida a la subjetividad, la caracterización de los humedales y el seguimiento de su evolución en el tiempo permite apreciar los cambios en el estado de conservación de los mismos.

La tendencia y objetivo medioambiental es que la mayoría de los humedales aumenten su índice con el paso del tiempo, sin que necesariamente todos tengan un índice 5. La asignación de figuras de protección puede ir encaminada a lograr un cierto grado de conectividad en los humedales del *Complejo*, recuperando la proposición de una entidad medioambiental conectiva (*Rey Benayas, 1991*).

Dado que hasta ahora los humedales presentes en el *Complejo* han sido representados como puntos, surge la necesidad de digitalizar el cuenco de las lagunas y su zona de influencia, con objeto de calcular sus parámetros morfométricos y alcanzar una caracterización adecuada. Para ello se han digitalizado ambos elementos sobre la ortoimagen del año 2000, con objeto de evitar cualquier tipo de deformación inherente a las fotografías aéreas.

Con todos los humedales digitalizados como polígonos se ha generado una cartografía específica y una cobertura digital para su tratamiento GIS. El tratamiento geográfico de esta cobertura ha permitido calcular ciertos parámetros morfométricos, tales como la longitud de los ejes, área y perímetro del cuenco para los más preservados o zona de influencia para los más degradados. La profundidad de la lámina de agua ha sido determinada en campo.

En la cartografía siguiente se presenta la distribución de humedales inventariados en la zona de estudio y su zona de influencia. Los colores se han establecido de acuerdo con su clasificación por su estado de conservación y funcionamiento (Fig. 4.31).

De todos los humedales estudiados, 55 presentan un cuenco o área de influencia reconocible que permite atribuir a esa superficie tal condición, mientras que 28 corresponden a humedales relícticos o dudosos, en los que no se ha podido determinar su cuenco ni área de influencia.

Los 55 humedales primeros han sido digitalizados como polígonos, permitiendo su caracterización morfométrica. Los restantes 28 han sido digitalizados como puntos, localizados en el centroide de la zona de dudosa clasificación. Aquellos con vestigios adicionales han sido caracterizados morfométricamente, si bien los parámetros asignados deben ser considerados indicativos, dado su elevado grado de afección.

En la cartografía de la figura 4.31 los humedales indiciales aparecen representados como puntos de color rojo, mientras que los restantes aparecen representados como polígonos azules.

Ambos tipos de humedales se presentan en el anexo 4.2.1, “*Caracterización morfométrica*”, quedando sin cumplimentar los datos de los humedales más dudosos.

La tabla donde han quedado recogidos estos parámetros presenta la estructura siguiente:

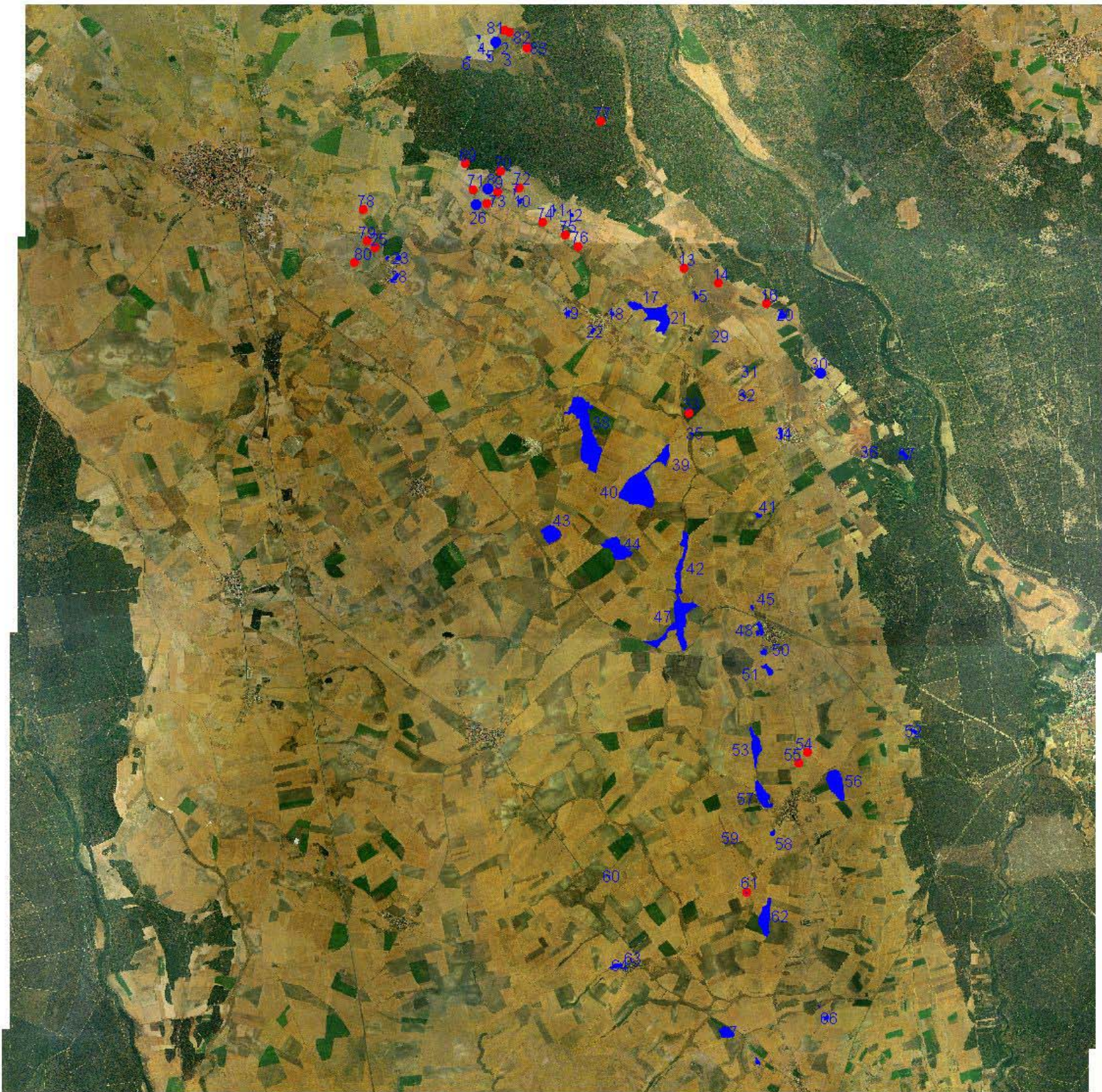
- N°. Número de humedal con respecto al inventario.
- Tipo. Color asignado de acuerdo con el criterio de clasificación propuesto.
- Est. Cons. Estado de conservación, de acuerdo con la nueva clasificación presentada en el apartado 5.6.
- Nombre. Toponimia del humedal. En la mayor parte de los casos son innominados.
- Localidad. Término municipal.
- Fecha. Es la fecha de medición de los principales parámetros, excepto el área, perímetro, eje mayor y menor, que se han realizado sobre ortoimágenes de agosto de 2000.
- Coordenadas UTM del centroide de cada polígono, obtenidas en campo o, por lo general, en gabinete.
- Morfometría del cuenco. Para los humedales mejor preservados. Recoge cinco datos básicos: área del humedal; perímetro; eje mayor o distancia máxima entre los puntos del perímetro; eje menor o distancia máxima medida en la perpendicular de la línea del eje mayor, y profundidad de la lámina de agua, cuando la había, en verano de 2003. Esta ha sido determinada en campo con escala sobre zapata plana para evitar la hincapié en los sedimentos del fondo.
- Morfometría de la zona de influencia. Los parámetros son similares a los anteriores, exceptuando el espesor máximo de la lámina de agua.
- Otros. Indica la presencia de escala, la cota de la misma cuando la hay (no hay en ningún caso), y las referencias bibliográficas encontradas donde hay alusiones previas al humedal, así como observaciones adicionales.

El encabezado rojo de la tabla corresponde al área de influencia mientras que los de color negro lo hacen al cuenco lagunar.

Esta cartografía representa un “punto de partida” para la caracterización y futuro seguimiento de los humedales del *Complejo*.

Fig. 4.31. Cartografía donde consta la ubicación y superficie de los humedales inventariados en el Complejo de Coca-Olmedo en la primavera de 2004, clasificados de acuerdo con su estado de conservación y funcionamiento. La cartografía representa un punto de partida para el estudio de su tendencia evolutiva futura, en caso de iniciarse en la Cubeta las operaciones de recarga artificial precisas.

Humedales del Complejo Coca-Olmedo



ESCALA 1:100.000

LEYENDA

- Humedales Indiciales
- ▀ Humedales



5.7. HUMEDALES CONECTADOS CON ACUÍFEROS EN LA ZONA DE ESTUDIO

La conexión a acuíferos es una condición inherente a la definición genérica de humedal, que engloba diversos espacios físicos que tienen en común que su régimen hídrico está condicionado, en mayor o menor medida, por las interrelaciones entre las fases superficial y subterránea de las aguas.

De todos los humedales presentados en el apartado anterior se ha estudiado cuáles son hidrodependientes⁶, es decir, aquellos cuyo funcionamiento está directamente vinculado con el acuífero. La mayor parte de ellos presentan un funcionamiento endorreico por recolectar aguas de escorrentía a favor de la topografía, con influencia de un escaso caudal de aguas subterráneas de corto o largo recorrido correspondientes a flujos locales, intermedios o regionales (Tóth, 1971; 1972; 1999; Custodio y Llamas, 1983).

Se trata de humedales que reciben tanto aguas de escorrentía superficial como subterráneas, al encontrarse en continua interacción con el acuífero. De ahí que sean ecosistemas importantes y productivos que se caracterizan por ser menos fluctuantes que los que sólo dependen del agua superficial.

Al percibir diferentes contribuciones hídricas, sus formas de fluctuación se ven incrementadas, tales como el nivel freático, la profundidad del agua en el cuenco del humedal, su perímetro mojado, la salinidad de sus aguas y otras características químicas, lo que condiciona de forma directa su rango de biodiversidad.

La morfología y funcionamiento de los humedales hidrodependientes puede ser diversa, pudiendo constituir bodones, lagunas, lagos, áreas fluviales, etc. Aparecen en una gran variedad de circunstancias, como cerca de fondos de valles, en interfluvios, en áreas bajas, en áreas costeras, asociados a grandes lagos, etc.

El agua subterránea que se incorpora al cuenco del humedal tras recorrer un circuito subregional suele presentar un escaso rango de variabilidad, y tiene gran influencia en los balances de agua y de sales. De este modo aseguran la persistencia de hábitats permanentes, esenciales para un amplio conjunto de plantas y animales no migratorios (Custodio, 2001a), y, en definitiva, del estado ecológico del humedal.

El agua subterránea se convierte en el garante de la supervivencia de las especies hidrófilas. En aquellos casos en los que no aflora en superficie, pero la vegetación se mantiene, se emplea el término “criptohumedal” (Custodio, 2001a), según se ha definido con anterioridad.

Los métodos para realizar un seguimiento de las relaciones entre el agua subterránea y el humedal son, en general, darcinianos, si bien hay que considerar ciertos aspectos específicos, como son:

- El seguimiento del *Complejo* a nivel regional.

⁶El término hidrodependiente aplicado a humedales dependientes del agua subterránea se presta a ciertas controversias, ya que hay autores que defienden que todos los humedales son “hidrodependientes” mientras otros reservan este término para los que dependen de las aguas subterráneas (LBAS, 1994).

- El estudio de la variación litológica de sus suelos y sedimentos a lo largo del tiempo, definiendo inicialmente su capacidad de intercambio iónico y sus capacidad sortiva.
- La influencia de las extracciones en el circuito, especialmente de sondeos perforados con posterioridad a la caracterización inicial del humedal. Es un hecho conocido que la explotación de acuíferos cambia las condiciones hidrodinámicas y afecta a la calidad del agua subterránea que llega a los humedales. Con frecuencia la superficie del humedal decrece y la salinidad aumenta como consecuencia de numerosos y variados factores en procesos lentos y diferidos (*Custodio, 2001a*).
- El seguimiento de las redes de control piezométrico e hidroquímico, que permita apreciar cambios significativos en la cantidad y calidad, bien sea natural o antrópica.
- La influencia de procesos contaminantes, que pueden provocar impactos ambientales adversos, como por ejemplo la repelencia al agua de la arena seca, lo que conlleva afecciones en la forma y tasa de recarga (*Custodio, 2001a*).
- El conocimiento detallado de las fluctuaciones del nivel freático y de la elevación capilar en el humedal.

En principio, de acuerdo con el inventario de humedales dependientes del agua subterránea presentado en el LBAS (*MOPTMA, MINER, 1994*), sólo uno de ellos está regulado por el nivel freático de las aguas subterráneas y por el aporte de flujos locales y regionales. Se trata de la Laguna de Caballo Alba, declarado Espacio Natural Protegido SG-1 por la Junta de Castilla y León ([URL: www.jcyl.es](http://www.jcyl.es)). Fue identificado como humedal 735 (*MOPTMA, 1994*) y digitalizado como un punto de coordenadas UTM: X= 365529 e Y= 4567306.

Una vez completado el inventario de humedales del *Complejo* y conocida la relación de los humedales con los sistemas de flujo subregionales, se puede concluir en que la mayoría de ellos son *hidrodependientes* en cierta medida. Los criterios establecidos para su atribución plena a este grupo han sido los siguientes:

- No se puede aplicar este término ni a los asociados a la red de escorrentía superficial, ni a aquellos endorreicos emplazados sobre sedimentos de baja *permeabilidad* (*Facies Cuestas con comportamiento de acuitardo*).
- Es requisito esencial que sean de agua salada, salvo que presenten aguas dulces, estén emplazados en arenas de la *Fm. Arévalo*, y su nivel sea el freático (caso de los areneros).
- Deben presentar un grado de preservación suficiente. Por este motivo han sido excluidos todos los humedales clasificados como “rojos”, por presentar un grado de preservación muy bajo. Este hecho entra en contradicción con el alto valor ecológico de los ecosistemas más frágiles, no obstante se ha adoptado este criterio dada su aparente inviabilidad de recuperación.
- No tener carácter de “indiciales”. Deben ser humedales “seguros” más que “supuestos”.

- Deben presentar vegetación hidrófila aunque no presenten lámina de agua, incluyendo en este punto a los criptohumedales.

Como resultado, sólo 24 de los 82 humedales inventariados cumplen todos los requisitos para ser considerados *hidrodependientes* (Tabla 4.04):

Nº	NOMBRE	X	Y	Z	AG	C µS/cm	pH	SAL%	TSDppm	fecha	E. C.
6	Juncarral	362876	4574044	749,0	S						5
7	Bodón de la Liebre	363580	4571974	754,5	N						4
12	Bodón Guarrero	364467	4571575	757,0	S	12000	9,0			jun-99	4
15	Bodón de la Vega	366407	4570320	762,5	N						4
17	La Cárcaba	365458	4570158	762,6	S	1822	8,74	3,6	913	jul-03	4
23	Carcava Grande	361753	4570906	758,0	S	13180	9,73			oct-03	4
27		361671	4570562	759,0	S	1130	7,86			oct-03	4
28	Carcava Chica	361733	4570619	759,0	S	3900	9,23			oct-03	4
33		366283	4568485	772,0	N						2
38	Laguna de Valdeperillán	364791	4567848	762,8	N						3
40	Laguna de Caballo Alba	365529	4567306	768,7	N						3
43		364150	4566613	774,6	N						3
45		367263	4565494	794,9	S	1298	8,11	2,5	650	ago-03	3
46		367272	4565455	794,8	S	2040	8,1			jun-99	3
49		367354	4565070	795,6	S	2036	8,08	4,0	1016	ago-03	4
50		367451	4564778	797,0	N						3
51		367525	4564520	798,2	N						3
53	Laguna de Valderuedas	367332	4563161	799,0	N						2
56	Laguna De La Iglesia	368570	4562726	786,9	S/N						4
57	Laguna de las Eras	367434	4562545	798,1	S	23660	9,1	46,2	11.83	ago-03	5
58		367601	4561954	808,2	N						3
62	Laguna de Fuente Miñor	367446	4560584	812,8	N						3
66	Bodón de la Hiruela	368426	4559078	802,6	S	3080	8,62	6,1	11.52	ago-03	4
67	Humedales de Bernuy	366880	4558862	815,4	S	2368	8,85	4,6	11.83	ago-03	5

Tabla 4.04. Humedales del Complejo Coca-Olmedo que cumplen las condiciones de “hidrodependientes.”
La leyenda de las columnas es similar a la empleada en la tabla 4.04. El color corresponde a la categoría otorgada según la clasificación propuesta.

5.8. GRADO DE PROTECCIÓN DE LOS HUMEDALES EN LA ACTUALIDAD

Actualmente no existe *quorum* alguno para unificar los criterios de clasificación de los distintos rangos de los Espacios Naturales Protegidos (ENP), a pesar de las propuestas presentadas por la IUCN (*International Union Conservation Nature*) de unificación en el ámbito internacional. Incluso dentro del territorio español existe una falta de coordinación remarcable en cuanto a la definición de las figuras de protección en las distintas autonomías, las cuales se rigen por sus estatutos específicos.

El acuífero de Los Arenales carece de cualquier tipo de protección. En la zona de estudio dos lagunas [(la *Laguna de las Eras* (SG-2), en Villagonzalo de Coca (Fig. 4.32), y la Laguna de la *Vega*, en Navas de Oro (esta última fuera del *Complejo*)] están catalogadas de *interés especial*. Esta *figura* implica limitaciones en los usos: están vedadas totalmente a la pesca, pero no están incluidas en ningún tipo de programa o proyecto de restauración y recuperación.

Hay dos lagunas adicionales del *Complejo* que gozan de figura de protección, la Caballo Alba (SG-1) en Villeguillo y la de la Iglesia (SG-3), en Villagonzalo de Coca (Fig. 4.33). Ambas se encuentran secas en la actualidad, si bien, según datos de encuestas, tienen inundaciones ocasionales. De hecho, la Laguna de la Iglesia estuvo inundada por última vez en 1999.

Estas lagunas corresponden a los números 40, 56 y 57 del inventario.

Rey Benayas ha propuesto que la política de protección de los hábitats de descarga de aguas subterráneas debe basarse en una optimización y control del uso de los recursos hídricos, así como la potenciación de la explotación sostenida de los mismos (*en Rey Benayas, 1991 y 1992a*). Recomendaba la creación de una red conectiva de humedales protegidos en el área de estudio, según el criterio de representatividad, es decir, conservación de una fracción característica de cada tipo de humedal. Según este autor, todos los humedales inventariados en su trabajo deberían formar parte de una red de espacios naturales protegidos, haciendo eco de los postulados de la Ley 4/1989.

En la actualidad ninguno de los humedales del *Complejo* están catalogados como LIC, ZEPA, ENP o Ramsar, estando catalogadas por la figura autonómica “de interés especial”, de acuerdo con la normativa de la JCL. Esta limitación restringe el uso, pero ni siquiera es preciso dejar una franja de al menos 15 m entre el borde y cualquier actuación, como ocurre con los LICs.

El seguimiento de la evolución de los humedales, mediante un sistema de indicadores, posibilitará controlar el pulso a los humedales de forma periódica, obteniendo criterios relativos a su mejoría o empeoramiento en función de las actuaciones que se desarrollen directamente en los humedales, en su área de influencia o en el acuífero.

Dado que en la actualidad han comenzado labores de recarga artificial (AR) en el acuífero, aún en el caso en que no se utilicen caudales para objetivos medioambientales, la reducción del impacto ambiental generado por los regadíos debe repercutir, de forma directa, en los ecosistemas degradados en un pasado reciente por el uso excesivo de las aguas subterráneas.



Fig. 4.32. Laguna de las Eras, catalogada de interés especial (SG-2) por la JCL. Agosto de 2003.



Fig. 4.33. Laguna de la Iglesia, catalogada de interés especial (SG-3) por la JCL. Agosto de 2003.

6. DISEÑO Y APLICACIÓN DE CRITERIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL

La ingeniería ambiental, por definición, es la disciplina encargada del desarrollo de nuevas técnicas y estudios orientados al conocimiento y evaluación de las variables medioambientales, con incidencia en materias de ingeniería civil y obras públicas (CEDEX, 2002).

El término ingeniería ambiental precisa el diseño de propuestas específicas de aplicación, principal objetivo de este tema.

Bajo este epígrafe se engloban las actividades relacionadas con la identificación de impactos, su evaluación, seguimiento, proposición de alternativas y elección de la más apropiada, actividades desarrolladas a lo largo del apartado 6.

6.1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

En este apartado se pretende llevar a cabo una identificación de los impactos que han operado en el *Complejo*, tanto en los humedales como en otros elementos clave, identificando los distintos agentes y procesos históricos desencadenantes del desequilibrio hídrico, y valorando su grado de contribución.

Asimismo identificar aquellos nuevos impactos “fruto del progreso”, que han aparecido o es previsible su aparición tras el inicio de las operaciones de AR en la *Cubeta*.

El apartado guarda paralelismo con el punto 2 del artículo 2.1, de la Ley 6/2001 de evaluación de impacto ambiental.

A este respecto hay varias disposiciones legales relativas a la identificación de impactos que afectan a las masas de agua superficiales continentales, como, por ejemplo, en la Directiva 2000/60/CE, Anejo II, 1.4, bajo el título “*identificación de presiones*”, se alude a ciertos *indicadores de presión*, que son la contaminación de fuente puntual y difusa, las extracciones significativas de agua y pérdidas en los sistemas de distribución, la incidencia de la regulación del flujo del agua, incluidos trasvases y desvíos, la identificación de las alteraciones morfológicas de las masas de agua y otros tipos de incidencia antropogénica en el estado de las aguas superficiales, generalmente provocados por los distintos usos del suelo.

El objetivo pretendido es la identificación de impactos que han actuado sobre el medio y provocado el desequilibrio hídrico que ha afectado principalmente a los humedales (impactos pretéritos, actuales y futuros previstos).

Entre los elementos clave cabe destacar los pinares que han dado nombre a la comarca. El 90 % de los montes de la zona de estudio se encuentran ocupados por el pino resinero (*Pinus pinaster*), desarrollados sobre los suelos arenosos silíceos, y en parte son responsables de la existencia de mantos freáticos próximos a la superficie.

Se presenta un listado de los principales factores a considerar al planificar actividades de recarga artificial o diseñar modelos de gestión de Espacios Naturales Protegidos con presencia de humedales, bien sea en el *Complejo* o en cualquier otro ámbito geográfico.



La metodología aplicada al proceso de identificación de impactos se basa en el análisis de interacciones entre las actuaciones llevadas a cabo y las previstas para el futuro con los elementos del medio.

El desarrollo del proceso y los instrumentos metodológicos adoptados pueden sintetizarse en los siguiente puntos:

- Identificación de las acciones que han operado en el sistema durante décadas provocando impactos ambientales.
- Determinación de acciones susceptibles de producir impactos en la actualidad.
- Determinación de los efectos potenciales de las actuaciones y análisis de las interacciones en el futuro.

La identificación de los impactos que han conducido al desequilibrio hídrico se ha llevado a cabo por tres procedimientos consecutivos en el tiempo:

- En primer lugar, se ha analizado históricamente la evolución del territorio, desde la prehistoria hasta la actualidad, con objeto de detectar los impactos de perspectiva histórica e identificar los “Agentes y procesos desencadenantes del desequilibrio hídrico.”
- Por otro lado, durante la realización del inventario exhaustivo del Complejo de humedales de Coca-Olmedo se ha llevado a cabo la identificación in situ de los diferentes impactos que han incidido negativamente en las zonas húmedas y elementos clave adicionales en la actualidad, descritos como: “Impactos ambientales detectados en campo”. Se ha adoptado además el criterio de no descartar *a priori* ningún efecto que presente cierto riesgo de ocurrencia o recurrencia.
- Por último, sin perder la perspectiva histórica, aunque sea futurista, se prevén los impactos que cabe esperar operarán en el futuro, con especial atención a los derivados de las operaciones de AR, entendida como técnica de regeneración hídrica.

Al tratarse de un medio bastante frágil es preciso tener una especial consideración en su *homeostasia*, o capacidad de autorregeneración o reacción de los elementos, y la *resiliencia*, o capacidad del sistema para resistir ante los cambios.

Otra línea que requiere especial atención es la identificación y justa valoración de los llamados “*efectos ecosistémicos contraintuitivos derivados de la intervención*” (Gómez Orea, 1999; MIMAM, 2000), como son los sinergismos, tendiendo a determinar su umbral de impacto y de aptitud.

6.1.1. Agentes y procesos históricos desencadenantes del desequilibrio hídrico

Desde una perspectiva histórica, la evolución del territorio está relacionada con la ocupación humana, conocida en toda la cuenca sur del Duero desde el Paleolítico Superior, incluidos *Los Arenales* y las campiñas.



De acuerdo con *De Meers, 1992*, la evolución de las zonas húmedas en relación con la ocupación humana y sus actividades en la zona de estudio ha pasado por varias etapas, desde la armonización hombre-naturaleza hasta la transformación e incluso destrucción de zonas palustres. Estas actividades son descritas a continuación.

Esta ocupación se desarrolló de forma muy dispersa y extensiva, puesto que los efectivos de población aún eran muy escasos, motivos por los cuales el efecto antrópico sobre el medio no fue muy significativo.

Algunos yacimientos arqueológicos son bien conocidos por los habitantes de la zona, como es el de *Betaya*, de origen íbero; *el Sanchón* y *el Hornillo*, donde se han encontrado monedas romanas, *Prado Valondo*, etc., todos en las inmediaciones de Santiuste de San Juan Bautista.

Estas ocupaciones fueron bastante extensivas hasta el siglo X, sin representar alteraciones sustanciales del ecosistema climácico original. Así pues, es a partir de la Reconquista cuando se origina una ordenación espacial, que inicia una modificación profunda del medio.

La articulación del territorio fue realizada de acuerdo con el aprovechamiento extensivo de los pastizales asociados a los humedales que caracterizaban el paisaje natural, asociados a las vías de comunicación de las cabañas ovinas. El ganado lanar trashumante necesitaba, en sus largos recorridos, ubicar descansaderos dotados con puntos con agua. Es por eso que la mayor parte de los núcleos urbanos de la época se ubicaran asociados a las vías pecuarias, destacando la Cañada Real Leonesa Oriental, en la margen derecha del río Voltoya.

De este modo, la gran mayoría de los núcleos de población estaban ubicados en pequeñas colinas adyacentes con bodones, que cumplían con varias funciones esenciales, asegurando la existencia de aguas subterráneas a escasa profundidad, permitiendo la excavación de pozos y el riego de pequeñas huertas. A su vez, las márgenes de estos lavajos servían de pastizales para los animales de tiro –*las huelgas*–; y en ocasiones permitían pescar. Alrededor del núcleo se roturaba un terrazgo cerealista con abundancia de pastizales y gramales que servía de transición hacia las masas forestales climácicas, salpicadas de humedales, y servía de pastizal de la cabaña ovina estante y trashumante. De ahí el desarrollo de la red de cañadas, cordeles, veredas y caminos de herradura de la Mesta, como una manifestación más de los cambios drásticos en el paisaje originados por ella.

En algunos casos los núcleos urbanos quedaban asentados junto a antiguas zonas húmedas, en las que las concentraciones de sales eran tan altas que precipitaban en la superficie, como ocurre, por ejemplo, en Aguasal, de acuerdo con el origen toponímico de la población. Estas eflorescencias fueron explotadas como salinas.

En consecuencia, las zonas húmedas existentes estaban integradas en un sistema de explotación tradicional con una serie de funciones que permitían su utilización sin implicar su transformación. De este modo los humedales se conservaron gracias al gran valor socioeconómico que representaron en esta época.

A partir del siglo XIX el sistema tradicional de explotación resulta modificado por dos motivos sustanciales: La desaparición de la Mesta y el inicio del proceso de desamortización, con la subsiguiente intensificación de las roturaciones de montes. Éstos fueron los primeros detonantes de la desaparición de las zonas húmedas, y supusieron para algunas zonas la desaparición de la vegetación climácica. Muchos humedales comenzaron a ser desecados a favor de la agricultura y de poblaciones/repoblaciones con pinares en montes públicos, coincidiendo con una etapa de gran demanda resinera.

Éste puede ser considerado el punto de inicio de la dinámica causante de la disfuncionalidad actual.

A lo largo del siglo XX los procesos destructivos se agravan, causando la degradación directa de los bodones y otros elementos relacionados con las aguas subterráneas hasta su situación actual.

Sin embargo, es en los últimos treinta años cuando se ha producido el mayor número de desecaciones y desapariciones de humedales.

Entre las principales amenazas a las que se enfrentan las zonas húmedas cabe destacar las siguientes:

- 1). Primero **explotación** y después **sobreexplotación del acuífero** a favor de la agricultura de regadío, propiciada por la política desarrollista de la España de la posguerra, basada especialmente en la agricultura (*Custodio, 2002*). Este hecho se acelera desde la invención de la bomba con motor de explosión, que han desplazado a las primitivas norias que salpicaban la zona de estudio. Los efectos primarios son directos. Cabe citar los cambios en el régimen de humedad del suelo, estrés hídrico de la vegetación hidrofítica, cambio en las pautas hidrodinámicas de cursos y láminas de agua. Como efectos secundarios destaca la sustitución de comunidades vegetales y pérdida de biodiversidad, erosión del suelo, facilitación de la roturación de humedales, pérdida de las funciones y valores de los humedales.
- 2). Drenaje y desecación de las zonas húmedas para su transformación en áreas de cultivo.
- 3). Contaminación por vertido de residuos sólidos urbanos, residuos ganaderos e industriales y contaminación difusa, especialmente en aquellos situados en las cercanías de núcleos urbanos.
- 4). Desecación para acoger la creciente demanda urbanística y la creación de vías de comunicación.



Fig. 4.34. El alumbramiento de aguas mediante norias y acémilas ha sido una pauta habitual en la zona de estudio durante el desarrollo agrícola de los siglos XIX y XX, hasta la implantación de la bomba con motor de explosión. (Fotografía cortesía de Luis Galán).

El ecosistema climácico ha quedado reducido a un grupo de humedales que mantienen cierta cantidad de agua sólo en las estaciones lluviosas, y no todos ellos, cuando tradicionalmente eran permanentes.

La respuesta de las zonas húmedas a este estímulo se ha traducido en la adaptación hacia condiciones de menor disponibilidad de agua, perdiendo además su funcionalidad como hipocentro de los pastizales que alimentaban a la cabaña ganadera, de ahí el intento de su transformación por parte de los agricultores en terreno cultivable, objetivo conseguido en la mayoría de los *no salinos* gracias a la transformación posibilitada por la mecanización agronómica y la desecación a través de canales de drenaje como consecuencia de las sucesivas concentraciones parcelarias.

Estos impactos se identifican como dos de los más importantes a la hora de elaborar indicadores de estado y presión para la modificación de zonas húmedas en tierras de cultivo: el drenaje del humedal y su roturación y cultivo.

Esta política de transformación agraria se implantó en la colectividad a mediados del siglo XX, fomentado en gran parte por la erradicación del paludismo, hasta el punto de generar una mentalización en la población que no encuentra inconvenientes para la transformación de zonas húmedas en terrazgo productivo, conduciendo a las zonas húmedas a la pérdida de su incardinación tradicional y sumergiéndolas en un proceso de regresión permanente.

El problema se ha agravado con los bodones o lavajos de difícil transformación, por ser zona de recepción de flujos profundos o por presentar un sustrato salino que no admite cultivos, salvo vegetación halófila, detectándose varios casos para humedales colindantes a

cascos urbanos que se han convertido en escombreras, vertederos o bien han sido urbanizados, en un afán por buscar una finalidad práctica a un terreno considerado “*baldío e inútil*”.

En la segunda mitad del siglo XX persisten gran parte de los impactos que habían operado hasta entonces, “adicionándose” otros generados por las mejoras técnicas disponibles en agronomía y por la repercusiones de la Política Agraria Común (PAC). Algunos de estos impactos son positivos, y el cambio generado por el conjunto ha sido trascendental (MIMAM, 2000a).

Entre los objetivos de la PAC, cabe destacar los siguientes:

- Reducción de excedentes agrarios.
- Desarrollo integral de las zonas rurales.
- Fomento de la pluriactividad en el entorno rural.
- Protección del Medio Ambiente.
- Crecimiento de la incipiente mentalidad conservacionista en el ámbito rural.
- Aparece la figura del “guardián de la naturaleza” en este ámbito.

La política comunitaria de comienzos de los años 90 fomentaba el abandono de tierras, como ocurrió con los cultivos herbáceos en el bienio 1991/92.

Desde este bienio hasta final de siglo, la subvención de determinados cultivos y las facilidades otorgadas para realizar concentraciones parcelarias han contribuido a convertir gran parte del medio en una zona agrícola regable.

El resultado es la generación de un conjunto de nuevos baldíos dispersos entre el resto del terrazgo. Esta actividad representa un primer paso hacia la regeneración hídrica de los humedales más afectados, especialmente aquellos que más se resistían a albergar cultivos en su seno, pero resulta insuficiente para abordar los objetivos restantes: *el desarrollo integral y la protección del Medio Ambiente*.

La retirada de tierras baldías resulta insuficiente para la generación de masas forestales, pastizales y la recuperación de zonas húmedas, por lo que queda espacio para el diseño y aplicación de actuaciones que fomenten la pluriactividad, como puede ser la recarga de acuíferos a humedales hidrodependientes o estudios de hidrogeoquímica medioambiental, tendentes a la obtención de un paisaje complejo y a la reconstrucción de espacios de valor ecológico y ambiental, bien sean protegidos o no.

La compatibilidad de estas actividades con la PAC podrá desembocar en dos tipos de resultados: Baldíos dispersos si prevalece la explotación como sujeto o bien baldíos concentrados en áreas de regeneración ambiental.

En síntesis, la PAC ha representado una profunda transformación socio-económica, con implicaciones espaciales y medioambientales directas.

La **capacidad de acogida del medio**, entendida como indicador de la concertación entre el entorno y la actividad, ha comenzado a variar entre límites más anchos a medida que variaba la aptitud del terreno. Esta aptitud está asociada a las unidades ambientales



(Gómez Orea, 1999; EOI, 2000), que han sido definidas para la zona de estudio en la “Cartografía de unidades ambientales” del año 2000, presentada en el apartado 5.2.2. Esta cartografía puede ser considerada un indicador de la capacidad de acogida a medida que evolucionen las unidades ambientales en el futuro. No se ha localizado en los antecedentes consultados ninguna cartografía de Unidades Ambientales previa para esta zona.

6.1.2. Impactos ambientales detectados en campo

La determinación de los impactos se ha realizado mediante “*matrices de chequeo*” de tipo *Leopold* (Gómez Orea, 1990), estudiando, para cada uno de los elementos del medio, los efectos directos, inducidos y combinados que cada una de las actuaciones identificadas en el apartado anterior pueden producir.

Los impactos identificados mediante matrices tienen carácter de “*potenciales*”, es decir, su identificación requiere el empleo de técnicas adicionales, bien sean probabilísticas o selectivas por su significancia.

En su determinación se han considerado conjuntamente los siguientes criterios:

- *Magnitud de la actuación*: no se han considerado los impactos identificados para actuaciones cuya intensidad real se prevea irrelevante.
- *Extensión afectada*: dependiendo del tipo de impacto, se han omitido aquellos que sean puntuales y sin importancia ecológica.
- *Duración estimada*: se han aplicado los mismos criterios que en el caso anterior.
- *Calidad o importancia del recurso afectado*: Se ha prestado especial atención a aquellos impactos que afectan a recursos ecológicos o socialmente importantes.
- *Variaciones respecto a la situación pre-ocupacional*: se consideran de menor intensidad aquellos operativos al realizar la cartografía de Unidades Ambientales, si no varían tras la realización de ciertas actividades.

Una vez identificados es preciso llevar a cabo una “*depuración de resultados*”, eliminando todos aquellos carentes de significación ambiental y agrupar o aislar los restantes para incrementar la operatividad de la fase de valoración. El proceso consiste básicamente en confrontar los factores con las acciones, eliminando todos los que no cruzan y, consecuentemente, no generan impacto. El resultado es, por tanto, una matriz reducida.

Los factores del medio considerados, de acuerdo con los enumerados en el artículo 2 de la Ley 6/2001 de EIA, han sido: recursos hídricos, suelos, vegetación, fauna, paisaje, usos y aprovechamientos.

Una de las finalidades de este apartado es la elaboración de una matriz de chequeo específica “de diseño” para actividades de recarga artificial en zonas regables con presencia de humedales degradados por el regadío e intención de aprovechar aguas de recarga para fines medioambientales.

A tenor de los impactos inicialmente identificados se puede deducir que la palabra clave para justificar cómo se ha llegado al *entorno preoperacional* actual es el **regadío**.

Testimonios históricos bibliográficos relatan que la sobreexplotación del acuífero superficial ha estado provocada por la implantación de la agricultura de regadío, modificado el funcionamiento hidrogeológico del mismo al provocar descensos en el nivel freático de 50-60% respecto al espesor saturado inicial del acuífero. Las modificaciones más notables se han producido, lógicamente, en las descargas, desapareciendo las zonas húmedas, charcas salinas y manantiales al norte de Villeguillo, así como la recarga lateral del sector este del acuífero a través del oeste, al haberse independizado ambos (*IRYDA, 1990*).

El regadío constituye una actividad cuyo impacto ambiental debe ser promediado considerando los impactos positivos desarrollistas y socioeconómicos, pero también los negativos, que inciden con especial intensidad en los humedales por explotación de los sistemas acuíferos. El resultado es una secuencia de efectos primarios, destacando los cambios en el régimen de humedal del suelo, estrés hídrico de la vegetación hidrofítica, cambio en las pautas hidrodinámicas de cursos y láminas de agua; y efectos secundarios, como son la sustitución de comunidades vegetales, erosión del suelo, facilitación de la roturación de humedales, pérdida de las funciones y valores de los humedales (*Rey Benayas, 1991*).

La recarga artificial se justifica principalmente por la disminución de los recursos hídricos disponibles al producirse una progresiva transformación en regadío en la zona de estudio desde hace unos 50 años. La demanda creciente ha provocado descensos drásticos del nivel freático durante los últimos 48 años, afectando a las reservas del acuífero, según expone la tabla 4.01.

De este modo, la detección de serios problemas que afectan a la cantidad (disponibilidad de agua de recarga) y la calidad de las mismas requiere la elaboración de un estudio de vulnerabilidad (*MIMAM, 2001*).

A continuación se presentan los principales impactos detectados y se aborda el problema de la vulnerabilidad desde un punto de vista cuantitativo mediante el empleo de indicadores. Todos estos aspectos son ampliados posteriormente.

De forma particular, en nuestra zona de estudio, los principales impactos medioambientales que afectan o pueden afectar a los humedales y enclaves de valor ecológico, independientemente del origen y motivación de los impactos, pueden ser agrupados en las siguientes categorías: actividad consultiva (agricultura y ganadería), obra civil, introducción de procesos contaminantes y, sobre todo, uso público.

Entre los **impactos genéricos** en una relación causal, cabe destacar los siguientes:

- Hidrodependencia del humedal con acuíferos, especialmente si esta vinculación es con acuíferos sobreexplotados.
- Alteraciones en las pautas hidrodinámicas en la red de drenaje superficial y láminas de agua hipogénicas.
- Regadío con aguas subterráneas e incremento en los costes de extracción de aguas por descenso del nivel freático.
- Drenaje del humedal y consecuente incremento de la erosión del suelo.
- Presencia de cultivos alrededor.



- Prácticas agrícolas en las zonas de recarga, tales como uso de pesticidas, laboreo, drenajes, etc. con influencia en la composición química y en la estructura de la cadena trófica de los humedales.
- Vertido de residuos líquidos urbanos.
- Vertido de residuos sólidos urbanos y ganaderos (enterramientos de animales). En cuanto al enterramiento de animales, tradicionalmente eran depositados en el paraje Puente Torrecilla, en la carretera de Santiuste de San Juan Bautista a Moraleja de Coca. Actualmente se ha habilitado un emplazamiento cerca del puente de Betaya, en la carretera de Santiuste a Coca, cerca del trazado del Arroyo de la Ermita y del caz de recarga.
- Alteración de la vegetación hidrófila y estrés hídrico.
- Introducción de nuevas especies (cultivos).
- Urbanización dentro del perímetro de protección que será necesario implantar para su adecuada conservación.
- Carga ganadera y uso como abrevadero, por pastoreo o no.
- Excavado y movimiento de tierras, incluso para su dragado o represado con técnicas inapropiadas.
- Presión recreativa.
- Rellenado y colmatación.
- Extracciones de agua.
- Vertido indirecto de agroquímicos y pesticidas.
- Extracciones de áridos para construcción.
- Regulación hídrica.
- Regulación de actividades: caza, pesca, fines recreativos, medicinales, etc.
- Monocultivos. Pinares para explotación maderera y resinera.
- Tensiones sociales tras entrar *intereses* en competencia.

Desde un punto de vista más ecológico, según algunos autores, existen cuatro grandes áreas en las cuales la comunidad científica ha comenzado a dedicar una mayor atención en los últimos años para determinar el grado de impacto que las actividades humanas tienen sobre los ecosistemas acuáticos (*CMA JA, 2001*). Cabe destacar la introducción de especies exóticas, la sobreexplotación de especies, la contaminación de los ecosistemas acuáticos, y finalmente la intrusión técnica humana en ríos, lagos, lagunas y humedales (*Sandlund & Viken, 1997*).

El complejo lagunar no parecen sufrir alteraciones por introducción de **especies exóticas** o por **sobreexplotación** de las especies piscícolas. No obstante son impactos potenciales a tener en cuenta.

El tercer gran problema corresponde a la **polución** en estos ecosistemas producido por acidificación/lluvia ácida, eutrofización por nutrientes, metales pesados, sustancias tóxicas o polución térmica. A este abanico de grupos genéricos cabe añadir otros elementos más comunes en el sistema, como son las sales.

Finalmente, el cuarto problema que afecta a las láminas de agua corresponde a las **intrusiones técnicas** en los ríos, lagos, lagunas y humedales. La más importante ha sido el drenaje de lagunas y humedales.



Drenar tiene por objeto disminuir el nivel freático del agua para poder cultivar estas tierras o para favorecer el crecimiento de las masas forestales. Los efectos negativos del drenaje son varios:

- Disminuye el oxígeno en el medio como consecuencia de la reducción del volumen de agua (ésta se hace extrema en verano cuando el contenido de agua disminuye tanto que hace que la mayoría de los bodones se sequen, ya que el drenaje y la evapotranspiración supera las lluvias y la escorrentía superficial). En invierno, si el agua se congela en la superficie ocurre un fenómeno similar, al disminuir la acción del oleaje y el viento que mueve las agua intercambiando el oxígeno.
- En segundo lugar, y como consecuencia de esta variación del nivel freático, se producen erosiones de las orillas de la laguna que afecta al crecimiento de la vegetación arbustiva, limitando o reduciendo la disponibilidad de nichos para las especies animales

Además, esta disminución en la concentración de oxígeno limita las poblaciones de peces y pequeños invertebrados, ya que el ratio respiración/descomposición se hace cada vez más pequeño.

Las mayores alteraciones detectadas corresponden a fenómenos de colmatación y contaminación química por abonado, presencia de pesticidas en el suelo y en las aguas y desplazamiento y sustitución de la vegetación circundante como consecuencia de los cambios en los usos del suelo de origen agrícola que se desarrollan en la zona.

En el siguiente cuadro se presenta una matriz de chequeo de impactos que resume las distintas afecciones que pueden tener lugar en los medios acuáticos.



ACTIVIDAD HUMANA	CONSECUENCIA	EFFECTOS
Drenaje en la zona de recarga y/o masa de agua.	Disminución de la columna de agua.	Aumento de la temperatura del agua. Disminución del oxígeno disuelto. Puede limitar el crecimiento de los fotosintetizadores. Erosión en la orilla del lago por fluctuación del nivel de agua. Reducción de la vida del lago.
Empleo de fertilizantes.	Aumento de las formas solubles del fósforo y nitrógeno.	Eutrofización de las aguas. Aumento de la vegetación riparia. Reducción de la vida del lago.
Empleo de pesticidas.	Aumento de determinadas sustancias en su forma soluble (fósforo, simacina, etc.).	Eutrofización de las aguas. Eliminación de macro y microinvertebrados.
Alteración de la vegetación de, construcciones, extracciones de grava la zona de recarga.	Aumento de la turbidez por escorrentía superficial.	Disminución de la concentración de oxígeno. Disminución de la zona fótica. Aumento del sedimento en el fondo del lago. Reduce las poblaciones de peces.
Alteración de la vegetación en la orilla del lago.	Erosión por viento.	Pérdida de hábitat.
	Mayor aporte de nutrientes.	Eutrofización.
Introducción de especies exóticas.	Alteraciones en la cadena trófica .	Reducción de la biodiversidad.
Contaminación, química térmica, por metales pesados.	Alteraciones en la cadena trófica.	Reducción de la biodiversidad. Disfunciones migratorias. Toxicidad. Bioacumulación. Eutrofización.
Lluvia ácida.	Disminución de pH.	Liberación de metales pesados. Destrucción de huevos de anfibios y peces. Puede favorecer los procesos de eutrofización.
Sobreexplotación de recursos.	Usos deportivos, alimentación.	Reducción de la biodiversidad. Alteraciones de cadenas tróficas.
Construcciones (carreteras, vías ferroviarias, etc.).	Reduce la zona de recarga.	Disminución de la recarga de agua.
	Aumenta la erosión.	Turbidez.
Densidad de habitantes en la cuenca de recepción.	Aumenta la descarga de nutrientes.	Eutrofización.

Tabla 4.05. Matriz de chequeo para el estudio de afecciones y alteraciones en medios acuáticos (basada en y modificada de Sandlund & Viken, 1997).





Específicamente para la zona de estudio, los impactos genéricos identificados en la *Cubeta* tienen un grado de actuación diferente.

Cuantitativamente, la reducción de recursos hídricos del acuífero, bien almacenados o en proceso de transferencia a otros acuíferos, se manifiesta de diversas formas:

- Desección o reducción de caudales en manantiales, zonas de drenaje y captaciones.
- Cambios en las relaciones aguas subterráneas / aguas superficiales (afección a las redes de drenaje por generación artificial de nuevas canalizaciones y cauces, afecciones al curso de los ríos, a sus márgenes, a su régimen de funcionamiento y a su turbulencia).
- Incremento de la evaporación (como componente del ciclo hidrológico de una zona determinada).
- Posibilidad de conectar estratos en acuíferos multicapa al desaturar un contacto lateral, caso poco frecuente originado en acuíferos con lentejones o lentes de baja permeabilidad y una extensión significativa (llanuras de inundación). En estos casos se produce *descuelgue* de agua de los niveles más superficiales hacia los inferiores por los extremos, si en su entorno ha habido alguna detracción importante con la consecuente bajada del nivel freático. Este caso se ha detectado en el acuífero objeto de estudio.
- Incremento de la colmatación, bien sea natural o inducida por el hombre, que conduce inexorablemente a la desecación de los humedales (*Temño, 1995*).

En cuanto a las **afecciones cualitativas**, éstas pueden operar de varias maneras:

- Por efecto de la actividad agrícola, con introducción directa de contaminantes tipo fertilizantes, purines y materiales asociados a la actividad agraria. Ésta afecta, directa o indirectamente, a las concentraciones de un gran número de compuestos químicos inorgánicos en las aguas subterráneas. Por ejemplo, cabe destacar el nitrato, nitrógeno (en varias formas), cloruro, sulfato, hidrogeniones, fósforo, carbono, potasio (generalmente en cloruro), magnesio (en forma de dolomita), calcio, estroncio, bario, radio, arsénico, y una enorme variedad de pesticidas, productos de degradación y otros compuestos orgánicos (*Böhlke, 2002*).

Los problemas de contaminación más frecuentes ocasionados en este sentido son los incrementos de la turbidez, salinidad, sólidos en suspensión, así como en la temperatura del agua, con incidencia en la flora y fauna acuática y en el ritmo de saturación en oxígeno disuelto de la masa de agua. Este parámetro es dependiente de la permeabilidad de los terrenos atravesados, de la profundidad del nivel del agua y de la distancia a la red de drenaje.

El impacto del regadío es de doble sentido por afectar a las aguas subterráneas en cantidad y calidad, mientras que las aguas afectan a los cultivos por detracción de recursos hídricos o por desadecuación de la calidad.

A los impactos clásicos hay que añadir una nueva tipología de **afección de “nueva generación”**, que son los acumulativos y sinérgicos resultantes del efecto combinado de los efectos de los impactos ya identificados. Caben destacar como impacto cualitativo en las aguas subterráneas la variación en el tiempo de los **procesos contaminantes** generando **sinergismos**. Por ejemplo la oxidación de sulfuros por efecto de los nitratos de origen agrario, al darse el caso de que los minerales sulfurosos presentes en el acuífero contienen elementos traza en cierta proporción, como, por ejemplo, arsénico, zinc, níquel, cobre, cadmio y selenio. Estos metales pueden ser liberados al sistema y movilizados por diversos factores, entre los que cabe destacar la acidificación generada en el medio por procesos de oxidación de piritas en sedimentos no calcáreos (Böhlke, 2002). Estos procesos han sido detectados en la *Cubeta* en forma de sectores muy salinizados, presencia de vectores contaminantes orgánicos en las aguas subterráneas, elevadas concentraciones de nitratos, cloruros, fósforo, clorofila, y muy puntualmente nitritos, etc. También cabe destacar las trazas nocivas de derivados alquílicos del arsénico en forma de sal (arsenitos y arsenatos) y ácidos (monometilarsónico (MMA) y dimetilarsínico (DMA), etc. (Fig. 4.35). También se han detectado procesos de reoxidación de especies reducidas (Dillon & Pavelic, 1998; Cozzarelli, 2002).



Fig. 4.35. La presencia de minerales pesados en las aguas subterráneas, especialmente arsénico, constituye un impacto de gran intensidad y escala que ha requerido soluciones inmediatas y con fuertes desembolsos por parte de la administración para prevenir la arsenicosis. Ciruelos de Coca, febrero de 2002.

Uno de los principales problemas cuantitativos detectados es el producido por la existencia de captaciones que explotan niveles inferiores del acuífero multicapa, provocando el **descuelgue** del acuífero cuaternario superficial hacia compartimentos más profundos, dado que estos sondeos cuentan con su correspondiente autorización. La solución más viable se basa en mancomunar la explotación de estos sondeos o bien apantallar la zona de descuelgue para impedir el vaciado del acuífero superficial. En caso de aprovechar este descuelgue para la recarga es preciso conocer los fenómenos hidroquímicos y la evolución del agua subterránea con el reciclado de la misma, ya que las aguas del acuífero profundo tienen una alta alcalinidad.

La **recirculación** también presenta incidencias negativas en casos de reciclaje de las aguas procedentes de acuíferos profundos con alta alcalinidad, conductividad y salinidad, que son bombeadas y que posteriormente se infiltran en el medio interaccionando con los iones típicos de la litología del acuífero superficial, como ocurre en zonas con intensa explotación de sondeos profundos en la franja noreste de la *Cubeta*.

Los efectos del descuelgue y reciclaje de las aguas subterráneas se traducen en una degradación de la calidad química, afección a aprovechamientos legales o con derechos adquiridos.

Un tema adicional a tener en cuenta es la **salinidad**. La movilización de fuertes concentraciones de iones salinos presentes en el medio por el gran número de lagunas salinas fosilizadas con abundancia de minerales de la arcilla sódicos (trona, nahcolita), como ocurre en las inmediaciones de Ciruelos de Coca y Villeguillo, donde además persisten algunas lagunas salinas desecadas o pequeños “bodones” en superficie de alto valor ecológico (*MAPA, 1999a*).

El riesgo de **salinización** como consecuencia de la incorporación a las aguas subterráneas de aguas salinas puede resultar una limitación para el uso sostenible, además de una forma de disminuir el almacenamiento en el acuífero (*Herczeb & Leaney, 2002; Allison et al, 1990*).

Las acumulaciones salinas tienen un fuerte efecto en la hidrogeomorfología, ya que se producen principalmente en las áreas de descarga, sobre todo en las roturas de pendiente, en torno a los lagos y a lo largo de los arroyos (*Salama et al, 1997*). A este respecto cabe destacar que las altas concentraciones de arcilla y materia orgánica pueden producir altas conductividades y ser interpretadas, erróneamente, como concentraciones salinas.

Otro efecto importante es la interacción con **compuestos orgánicos** introducidos por el vertido de aguas residuales y el abandono de animales muertos, actividad frecuente en un pasado no tan lejano, de carente mentalización medioambiental hídrica por parte de algunos agricultores. El vertido y movilización de iones en zona no saturada ha requerido la elaboración de estudios específicos con objeto de determinar si la recarga resulta beneficiosa por dilución de estos contaminantes o bien conocer si su interacción con los iones acumulados en la zona no saturada pueden presentar efectos medioambientales acumulativos e incluso sinérgicos.

A este efecto hay que sumar la alta concentración de nitratos y nitritos que hay en zonas puntuales del acuífero, con intensa actividad agrícola, en los que durante años los excedentes de purines producidos en granjas de ganado porcino han sido vertidos indiscriminadamente al terreno de labor. La movilización de la **contaminación difusa** por nitratos y pesticidas es también un factor limitante.

En definitiva, los impactos en los hábitats de descarga de acuíferos se deben principalmente a la explotación del agua subterránea, desconocimiento de su génesis y menosprecio de sus valores y funciones (*Rey Benayas, 1991*).

En el apartado 6.2 se plantea una serie de indicadores medioambientales y una ficha específica para definir el entorno preoperacional de los humedales de la zona de estudio como punto de partida para poder llevar a cabo su seguimiento y evolución.

Como etapa previa a la evaluación de impactos cabe llevar a cabo una descripción de la susceptibilidad o vulnerabilidad del medio ante ciertos impactos, especialmente los relativos a las variaciones en la calidad de las aguas por vertidos.

6.1.3. Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación

Se interpreta **vulnerabilidad** como el grado de susceptibilidad o sensibilidad del medio ante la variación de varios impactos, entre los que destacan:

- Variaciones del nivel freático y del funcionamiento hidrogeológico inicial.
- Disminución de recursos y/o reservas de la unidad en términos del balance hídrico.
- La calidad inicial de las aguas subterráneas y superficiales.

El análisis y determinación de la vulnerabilidad para temáticas relacionadas con la hidroquímica, como puede ser la contaminación nítrica, no dispone de una metodología estandarizada y universalmente aceptada, existiendo varias alternativas, como son las cartografías de vulnerabilidad, el estudio de parámetros que determinan la aptitud de un terreno para el vertido, la adopción de un sistema de indicadores, etc.

Para la determinación de la vulnerabilidad se ha recurrido a la **cartografía temática de vulnerabilidad** del ITGE (*ITGE, 1996*). Según ésta, la zona de estudio queda enmarcada en el Grupo 1: “*Terrenos muy vulnerables por presentar alta permeabilidad por porosidad y carecer de protección*”.

A tenor de esta cartografía se aprecia que los acuíferos arenosos de este sector presentan en general una alta vulnerabilidad, como consecuencia de la alta concentración de sustancias nocivas. En general predominan aquéllas procedentes del abonado que se manifiestan en forma de contaminación difusa, especialmente nítrica, lo que representa un problema ya clásico.

Para establecer la vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación valorando la **aptitud de los terrenos frente a un vertido** se debe tener en cuenta la pendiente y escorrentía superficial condicionada por la topografía y las características

de los suelos (BOCL, 1998). A éstos hay que añadir la litología del sustrato rocoso, la permeabilidad del terreno y la hidrogeología (Bekesi & McConchie, 2002).

- **Pendiente y escorrentía**

La pendiente del terreno condiciona la escorrentía y el riesgo de erosión de los suelos. En general una pendiente mayor de 6-8 % genera mucha escorrentía superficial y alta erosión. En la zona de estudio la pendiente media es de 1,2°. La escorrentía se genera cuando se supera la capacidad de infiltración del terreno, y varía según su grado de saturación, de la existencia de costras superficiales y de la presencia de una capa superficial de suelo helado o con nieve.

- **Características de los suelos**

El elevado espesor de la capa superficial de arenas, junto con la suavidad del relieve y las peculiares condiciones climáticas (que llevan a un régimen de humedad del suelo ascensional) hacen que los suelos dominantes alcancen un escaso grado de desarrollo (Perfil AC), caracterizándose por presentar texturas arenosas, escasez de materia orgánica (débiles aportes de mediocre calidad), baja fertilidad, reacción próxima a la neutralidad y elevada aireación y permeabilidad (Gómez y García, 2003).

Éstos pueden ser clasificados como Arenosoles, mientras que aquéllos con los horizontes humíferos saturados de agua más de un mes al año (lagunas y charcas), se incluyen dentro de los Gleysoles, y los fuertemente antropizados por cultivo, en los Antrosoles (FAO, 1998).

Este territorio constituye un medio especialmente apto tanto para la instalación y desarrollo del pino resinero (*Pinus pinaster subsp. mediterránea*), dado su peculiar requerimiento ecológico.

Las características edáficas consideradas son: textura, profundidad, drenaje, y tipo del suelo. Texturas arenosas dan suelos porosos con baja capacidad de retención de agua, mientras que las texturas arcillosas o finas son propias de medios impermeables con alta retención de agua. Las clases presentes en la zona de estudio y sus características se resumen en la Tabla 4.06:

CLASE	LITOLOGÍA Y PERMEABILIDAD	PENDIENTE Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	PROF, TEXTURA Y DRENAJE DE LOS SUELOS	SUELOS DOMINANTES	CLASE DE APTITUD
6(14).	- Margas y arcillas. - Impermeable.	- Llana. - Débil.	- Reducida a moderada. - Arcillosa. - Deficiente.	Regosoles calcáricos. Cambisoles calcáricos, crómicos y eútricos. Vertisoles cálcicos y/o eútricos. Gleysoles eútricos y/o calcáricos.	- Aptitud mala. - Zona desfavorable. - Posible contaminación de las aguas superficiales y subterráneas..

8(19).	- Arenas eólicas. - Permeables.	- Llana. - Nula.	- Reducida. - Arenosa. - Excesiva.	Arenosoles albicos. Arenosoles cámbicos. Cambisoles dísticos.	- Aptitud muy mala. - Zona muy desfavorable - Posible contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.
9(20).	- Arenas y gravas. - Permeables.	- Llana. - Nula.	- Reducida. - Arenosa. - Excesiva.	Fluvisoles dísticos. Fluvisoles eútricos. Fluvisoles calcáricos.	- Aptitud muy mala. - Zona muy desfavorable. - Posible contaminación de las Aguas superficiales y subterráneas.

Tabla 4.06. Tipos de suelos presentes en la Cubeta de acuerdo con la clasificación de la FAO (1998).

• Litología y permeabilidad

En función de la naturaleza del material y de su permeabilidad se establecen las categorías de riesgo potencial de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas:

- Áreas muy vulnerables por permeabilidad por porosidad intergranular o por fisuración-fracturación. La circulación del agua es muy rápida en estos medios, y la capacidad de filtrado y autodepuración es mínima.
- Áreas poco vulnerables por tratarse de materiales impermeables. El agua se mueve con mayor dificultad y tiene mayor capacidad de filtrado y autodepuración (Durán, 1995).

6.1.3.1. Adopción de un sistema de indicadores de vulnerabilidad

Se trata de diseñar y adoptar un sistema de indicadores medioambientales, que pueden ser evaluados con anterioridad o durante el desarrollo de la actuación sobre el medio (recarga artificial, regadío, etc.), y mediante un sistema “rangos-pesos” se determina esta susceptibilidad.

Dada la ausencia de acuerdos metodológicos definitivos en la bibliografía consultada y dada la necesidad de establecer sistemas rangos-pesos “a la carta” en el desarrollo de este trabajo se ha elaborado un sistema de indicadores específico. Este método consiste en atribuir subjetivamente un peso o evaluación de la afección a cada parámetro o rango. Cada rango es cuantificado inicialmente con un indicador, y dependiendo de su importancia tienen un “valor de partida” determinado. El sumatorio de los productos de los rangos por los pesos da como resultado un valor numérico determinado. Estableciendo unos baremos para estos valores, es fácil incluir cada caso dentro de un rango de vulnerabilidad preestablecido.

El resultado de esta valoración se refiere a una vulnerabilidad intrínseca del acuífero y tendrá una influencia directa sobre la vulnerabilidad de otros elementos ambientales del entorno. Por ejemplo, presentarán una alta vulnerabilidad a variaciones de la calidad y a descensos del nivel freático aquellos acuíferos que presenten un alto

valor de permeabilidad (como es el caso de los materiales de las vegas aluviales) frente a la baja vulnerabilidad de materiales, como las arcillas; serán más vulnerables los acuíferos que presenten anisotropía horizontal que vertical, etc.

El principal inconveniente estriba en que este sistema da cierta cabida a la subjetividad en cuanto a valoración se refiere, a que la asignación de pesos requiere una cierta experiencia por parte del evaluador y que los rangos tienen distinta importancia en cada situación concreta.

Estos indicadores pueden carecer de validez si son extrapolados a otros contextos con diferente climatología, características hidrogeológicas e incluso marco legal diferentes, o no.

Los “indicadores de vulnerabilidad” (IV) propuestos se indican a continuación:

- IV. 1) *Posición del nivel freático en los criptohumedales*. Serán más vulnerables aquellos sistemas que presenten el nivel más cercano a la superficie.
- IV. 2) *Cercanía a un cauce fluvial*. Será más vulnerable un humedal alejado de un cauce fluvial que uno que dependa de éste. Este indicador puede ser modificado por alteraciones de la permeabilidad del sustrato y del espacio de acuífero entre humedal y cauce.
- IV. 3) *Permeabilidad del acuífero*. Serán más vulnerables aquellos acuíferos desprotegidos con alta permeabilidad, baja inercia y escasa capacidad de autodepuración, como es el acuífero arenoso de la *Cubeta*.
- IV. 4) *Tipo de acuífero*. Los más vulnerables serán aquellos de comportamiento libre y anisotropía horizontal. En el otro extremo estarán los confinados homogéneos.
- IV. 5) *Presencia de ecosistemas hidrodependientes dentro del área o cono de influencia*. Serán más vulnerables aquellos sistemas cuyo radio de influencia sea mayor (distancia medida en la horizontal entre una captación de la que se extraen determinados recursos induciendo un descenso del nivel del agua y otra que presenta un descenso del nivel freático cero por el bombeo de aquella en ausencia de otros condicionantes) que aquellos en los que el bombeo de la explotación se manifieste como un cono tendido de base menor.
- IV. 6) *Tasa de recarga*. Este indicador tendrá un peso variable dependiendo de la tipología del acuífero. En caso de detectarse procesos contaminantes en terrenos de baja permeabilidad, valores elevados de recarga contribuyen a su dilución, mientras que en zonas muy permeables con baja tasa de recarga actúa con mayor intensidad los procesos de autodepuración del terreno. Por tanto, la tasa de recarga influye en la vulnerabilidad en función de las características específicas del acuífero, sin que pueda establecerse una relación de proporcionalidad directa y estricta.
- IV. 7) *Presencia de ecosistemas hidrodependientes y termodependientes*. La presencia de un ecotono con especies poco tolerantes a los cambios de calidad del agua y temperatura induce una mayor vulnerabilidad, así como la presencia de

elementos sensibles a la depresión de niveles freáticos (freatofitas) y su relación entre la profundidad radicular y la posición del nivel freático, y también de aquellos elementos sensibles a variaciones de la calidad del agua.

- IV. 8) *Porcentaje de arcilla en el suelo.* A mayor cantidad de arcilla es previsible una mayor afección en la calidad del agua por sólidos en suspensión y turbidez.
- IV. 9) *Variaciones en el régimen hídrico.* Las zonas ubicadas en áreas con fuerte riesgo de inundación, como los puntos negros, son más vulnerables.
- IV. 10) *Relación con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas, etc.* Los acuíferos conectados hidráulicamente con otros acuíferos o con algunos de los elementos citados son más vulnerables que los desconectados. El entorno preoperacional lógicamente puede haber sufrido determinadas alteraciones previamente con influencia en la hidrología del sistema.

Hay muchos otros indicadores, como el valor del gradiente hidráulico, coeficiente de escorrentía⁷ etc., por lo que este listado de indicadores, presentado inicialmente como una proposición flexible basada en el conocimiento del medio para el que ha sido diseñado y en experiencias previas, debe ser modificado para cada caso específico y mejorado a medida que se obtenga nueva información de otros estudios hidrogeológicos.

El estudio de la importancia de cada indicador, y en especial de los siete primeros, permite establecer una primera aproximación al grado de vulnerabilidad de la zona en la que se pretende realizar una actuación de recarga artificial.

La asignación de un sistema de pesos debe tener en cuenta la importancia de cada indicador. De este modo la metodología propuesta quedaría como sigue:

- 1) Elección de los indicadores más relevantes del entorno preoperacional en el que está previsto llevar a cabo una actuación. *A priori* se consideran más relevantes los siete primeros.
- 2) Jerarquización de los más importantes y asignación de un rango fijo en este orden de importancia (cuanto más importante se considere el indicador, mayor deberá ser su rango). De este modo el producto rango por peso será multiplicado por una constante mayor que uno en los indicadores más importantes o menor que uno en los menos relevantes.
- 3) Atribución subjetiva del peso a cada indicador. Por ejemplo, se podría evaluar de 1 a 5 cada peso sobre unas directrices específicas para cada caso concreto. Por ejemplo, si el humedal a recuperar dista de 100 a 120 metros del cauce fluvial o de las infraestructuras para recarga artificial inducida el peso podría ser 5, si dista de 120 a 140 el peso sería 4, y si dista más de 200 metros se podría asignar un peso de 1.

⁷ Este indicador suele ir asociado al I.V. 6 (tasa de recarga) y presenta una tipología similar. En general un coeficiente de escorrentía alto conlleva una mayor movilidad hídrica, que estará condicionada por factores litológicos y fundamentalmente orográficos (pendiente, forma de la cuenca, etc.), que influirán en la vulnerabilidad de un terreno distintamente en cada caso.

- 4) Multiplicación de los rangos de cada indicador por su peso y cálculo del sumatorio de los productos.
- 5) Asignación de un grado de vulnerabilidad en base al valor resultante.
- 6) Estudio de la variación de este producto final a lo largo del tiempo durante el programa de seguimiento y control, con objeto de ver la evolución de la afección. Este seguimiento requiere el empleo de unos indicadores adicionales específicos.

Dada la multiplicidad de circunstancias que pueden concurrir, el sistema debe ser planteado para cada caso concreto.

El resultado de aplicar el método cualitativo de rangos-pesos propuesto conduce a la atribución a la zona específica de uno de los cinco rangos o situaciones establecidos en la legislación medioambiental vigente (vulnerabilidad despreciable, baja, moderada, alta y extrema).

De este modo, por ejemplo, podrían considerarse zonas de vulnerabilidad *extrema* las formaciones altamente permeables, con el nivel freático cercano a la superficie en un acuífero libre con presencia de captaciones en las inmediaciones, y desarrollo de ecosistemas hidrosensibles, mientras que otro humedal ubicado cerca de un cauce fluvial, con abundancia de arcillas, inmerso en un entorno de pendiente pronunciada, será de baja vulnerabilidad.

Una tipificación para zonas de vulnerabilidad *alta* serían las llanuras, valles, cubetas aluviales, acuíferos de carácter local, libres o semiconfinados en formaciones permeables de porosidad intergranular con zona saturada próxima a la superficie del terreno, especialmente si están conectadas con otras unidades de mayor importancia.

Las zonas de vulnerabilidad *moderada* serían aquellas con materiales de permeabilidad menor que los anteriores, aislados de acuíferos infrayacentes o situadas sobre un sustrato impermeable. También aquellas unidades permeables de acuíferos locales por porosidad intergranular donde exista fuerte anisotropía horizontal y con escaso interés ecológico y/o con deficiente calidad natural del agua.

Las zonas de vulnerabilidad *baja* o *despreciable* podrían ser aquellas cuyos materiales aflorantes son impermeables o de baja permeabilidad y que además no tienen acuíferos de importancia asociados. También podrían ser aquellas formaciones de muy baja permeabilidad bajo las cuales puedan existir acuíferos cautivos sin conexión hidráulica lateral o vertical.

Una adecuada valoración de la vulnerabilidad posibilita la elaboración de un plan de vigilancia y control acorde con las características del acuífero, así como una adecuada restauración de aquellos humedales más favorables por criterios técnicos, medioambientales y socioeconómicos.

La valoración debe ir acompañada de una cartografía que refleje la vulnerabilidad, cuya escala dependerá de la magnitud de los elementos descritos. Esta

cartografía constituye un instrumento administrativo para la planificación y ordenación del territorio.

La información podría ser integrada en una serie de capas temáticas o coberturas que contemplen:

- Topografía.
- Unidades hidrogeológicas.
- Posición de niveles freáticos o piezométricos.
- Valor ecosistémico del espacio natural y zonas de interés ambiental.
- Otros elementos de interés medioambiental por su valor ecológico, paisajístico, socioeconómico o cultural de alto valor contingente.

6.1.4. Impactos directos e indirectos de la recarga artificial (AR)

Una nueva tipología de afección cualitativa y cuantitativa detectada es la inherente a la recarga artificial iniciada el 5 de diciembre de 2002. Su seguimiento durante un ciclo ha permitido detectar y comenzar a evaluar ciertos impactos, si bien se trata de una actividad muy joven para conocer con detalle sus consecuencias, ya que gran número de impactos tienen carácter indirecto y/o diferido.

Entre los impactos ya identificados cabe destacar:

- Incremento del volumen de agua almacenado en el acuífero (+).
- Modificaciones en la calidad de las aguas del acuífero (+/-).
- Incidencia en el medio de las estructuras de recarga (-).
- Inundaciones puntuales en zonas donde el nivel freático ha llegado a la superficie topográfica (-).
- Colmatación de las paredes y fondo del caz de recarga (-). Se trata de un impacto tan importante que será tratado con detalle en el próximo apartado.
- Compactación de los limos del lecho y consecuentemente una disminución de la permeabilidad por la compresión inducida por la lámina de agua cuando su espesor es mayor de 1,40 m (*en Custodio y Llamas, 1983*) (-).
- Descenso de la permeabilidad del lecho por decantación de partículas finas sobre ellos y sellado de los poros durante la infiltración, lo que conlleva por lo general un descenso del nivel freático aguas debajo de la explotación (-).
- Erosión de los taludes, con desprendimientos y afección al tránsito de tractores y maquinaria agrícola por la vía de servicio del caz de recarga (-).

Existen otros tipos de impactos operando desde el inicio de las labores de recarga, pero por ser lentos o indirectos, su evaluación resulta inviable tras un ciclo de recarga.

No obstante, aplicando la técnica de escenarios análogos y viendo experiencias similares en otros lugares del mundo donde operan dispositivos parecidos, cabe mencionar otros tipos de impactos:

- Variación del régimen hídrico de la red fluvial global.
- Evolución de la calidad de las aguas: evolución de la contaminación difusa, de los metales pesados, de la salinidad, alcalinidad, de los vectores contaminantes orgánicos que hay en el acuífero en ZNS o ZS, estratificación hidroquímica, etc.
- Movilización de fuertes concentraciones de iones salinos de lagunas fosilizadas.
- Efecto del efecto de descuelgue y reciclaje de las aguas.
- Concurrencia de fuertes precipitaciones durante las labores de recarga artificial.
- Impacto ambiental como consecuencia de la colmatación del caz.
- Afecciones indirectas a elementos ambientales.
- Impactos socioeconómicos por ascenso del nivel del agua (inundaciones de bodegas, etc.).
- Menor recarga natural por impactos derivados de cambios de usos del suelo, especialmente forestaciones con vegetación arbórea perenne (-).
- Generación de condiciones oxidantes como consecuencia del embalsamiento de aguas en las estructuras de recarga.
- Generación de unas condiciones hídricas perturbadas.
- Contratiempos técnicos y jurídicos.
- Impacto en la vegetación nativa.
- Afección del ascenso del nivel freático en las raíces de los pinos resineros.

A continuación se explican estos impactos y se complementa la información relativa a la forma de actuación de los más importantes:

La variación en la **red fluvial** en general está escasamente estudiada, ya que resulta difícil establecer criterios cuantitativos para definir el caudal ecológico de un río (*Llamas et al, 2001*), o el efecto a largo plazo de la derivación de aguas del río Voltoya.



Los cambios en el funcionamiento hidrogeológico pueden presentar situaciones lesivas a largo plazo. Algunos de los interrogantes que deben ser cuestionados son ¿cuánto tiempo y a qué profundidad puede descender el nivel piezométrico bajo un humedal sin causar daños irreversibles en su flora y fauna? (*Llamas et al, 2001*). Esta cuestión debe ser determinada con el paso del tiempo, si bien la restauración de unas condiciones hídricas lo más parecidas posible a las originales a un humedal no debe representar un impacto ambiental negativo.

Un criterio operativo básico que subyace en esta misma filosofía y que debe regir las operaciones de recarga artificial es el denominado “**CHES**” o HydroCHEmical SuStainability (*Stuyfzand, 2002a*). Según este autor, “*las operaciones de AR son sostenibles cuando los efectos beneficiosos son renovables y continuos indefinidamente, sin efectos indeseables en sistemas adyacentes*”.

Tanto la depresión de niveles como las variaciones de la **calidad de las aguas** subterráneas podrá suponer una afección a elementos ambientales del entorno que estén relacionados con el acuífero, como, por ejemplo, los ecosistemas de ribera que pudieran acusar un cambio en la relación acuífero aluvial-río.

Los impactos debidos al **ascenso general del nivel freático** suelen ser especialmente significativos cuando implican la afección a algún elemento socioeconómico (inundación de terrenos de labor) y/o natural relacionado con el acuífero (humedales, vegetación de ribera, manantiales, lagunas). En el caso de ciertas comunidades vegetales, el encharcamiento de sus raíces puede influir negativamente en su desarrollo, como puede acontecer en la vegetación de ribera, cuyas raíces profundizan escasamente en el terreno. Este impacto ha sido detectado en las inmediaciones del Pinar Nuevo de Ciruelos de Coca. Como consecuencia, es previsible que al desaparecer la **columna aerobia de la ZNS**, disminuya el potencial autopurificador del terreno, si bien los procesos de purificación de las aguas son generalmente menos activos en invierno, que es cuando se ha ndetectado inundaciones incipientes por efecto de la recarga artificial.

La presencia de precipitaciones anómalamente altas durante el período en que menor capacidad de infiltración presenta el acuífero eólico superficial, al coincidir la época de recarga con elevados **excedentes hídricos “meteorológicos”**, trae como consecuencia la inundación de tierras de cultivo, la pérdidas de cosechas, la anegación de las estructuras de recarga, al recibir enormes cantidades de sedimentos movilizados por la erosión que obstruyen los distintos dispositivos y conllevan un deterioro de los dispositivos de AR y, en definitiva, de la capacidad de infiltración. Se ha detectado este impacto en campo, si bien los agricultores de la zona realizan surcos con excavadora en los terrenos de labor y dirigen las aguas acumuladas en la superficie hacia el pinar.

La generación de **domos en la superficie piezométrica** por razones hidrogeológicas (heterogeneidad del acuífero) puede representar impactos significativos, llegando a producirse inundaciones en zonas con el nivel freático muy cercano a la superficie. Entre éstos cabe citar el alcance de vertidos localizados en la ZNS y movilización inducida de los lixiviados, vertidos almacenados en fosas sépticas, fugas del alcantarillado y sistemas de desagüe, cementerios (de hecho ha habido protestas por la inundación de nichos en el cementerio de Villeguillo en marzo de 2004).

Los impactos hidrogeoquímicos detectados han sido los siguientes:

- Incremento de la carga disuelta y suspendida en el sistema acuífero.
- Desplazamiento de las aguas subterráneas nativas y reemplazo por otras aguas de menor salinidad en las inmediaciones del caz.
- Acumulación de fango en el fondo del caz de AR.
- Acumulación de contaminantes orgánicos en el acuífero.
- Aumento de la actividad de algunos componentes naturales del acuífero, como el carbonato cálcico (que actúa como un tampón), la materia orgánica (sorbente y catalizador para reacciones redox) y la pirita (catalizador para reacciones redox), procesos detectados especialmente en el sector central de la *Cubeta*.
- Acumulación de material colmatante en torno a los pozos de extracción más cercanos al caz de AR (especialmente óxidos e hidróxidos de hierro y finos).

La recarga artificial ha incrementado el **caudal de descuelgue a través de captaciones** que explotan niveles inferiores del acuífero multicapa, provocando el descenso de parte del agua del acuífero cuaternario superficial hacia compartimentos más profundos. El problema no tiene solución técnica fácil, ya que estos sondeos cuentan con su correspondiente autorización. La solución más viable se basa en mancomunar la explotación de estos sondeos o bien apantallar la zona de descuelgue para impedir el vaciado del acuífero superficial. En caso de aprovechar este descuelgue para la recarga, ha quedado demostrado que los fenómenos hidroquímicos propios de este medio conllevan un deterioro cualitativo, especialmente por el incremento de alcalinidad y sodio, no obstante, la recarga profunda se perfila como la técnica más idónea para regar en períodos de sequía prolongados, de ahí que pueda ser conveniente fomentar la recarga a través de estos sondeos, aún cuando su empleo se lleve a cabo con aguas de menor calidad en épocas de sequía acuciantes. Este tema es tratado con más detalle en el Bloque 5.

La **recirculación** también presenta incidencias negativas en casos de reciclaje de las aguas procedentes de acuíferos profundos con alta alcalinidad, conductividad y salinidad, que son bombeadas y posteriormente se reinfiltran en el medio, interaccionando con los iones típicos de la litología del acuífero superficial, como ocurre en zonas con intensa explotación de sondeos profundos en la franja noreste de la *Cubeta*, según ha quedado caracterizado en el Bloque 3.

Otro efecto importante es la interacción con **vectores orgánicos** introducidos por el vertido de aguas residuales y vertido de animales muertos en una época carente de mentalización hídrica por parte de los agricultores, que actualmente se encuentran en proceso de autodepuración. El vertido y movilización de iones en zona no saturada, de acuerdo con los resultados obtenidos en el bloque previo, apuntan a un incremento de los procesos contaminantes en un período no inferior a cinco años, y una lenta mejoría de la calidad de las aguas a largo plazo. A este respecto resulta clave el hecho de que los tiempos de tránsito del agua infiltrada en la ZNS sea tan corto con respecto a la ZS.

Un tema adicional a tener en cuenta es la **movilización de fuertes concentraciones de iones salinos** presentes en el medio por el gran número de lagunas salinas con abundancia de minerales de la arcilla sódicos (trona, nahcolita), fosilizadas por arenas cuaternarias. Este hecho ha sido detectado en las inmediaciones de Villagonzalo,

Ciruelos de Coca y Villeguillo, donde además persisten algunas lagunas salinas desecadas o pequeños “bodones” en superficie de alto valor ecológico, como son la Laguna de la Iglesia o de las Eras.

Los problemas originados por la **colmatación** en las paredes y fondo del cauce de recarga representan impactos de gran escala y magnitud. Se ha detectado la formación de un *cake* formado por finos inorgánicos y compuestos orgánicos, incluidos algas, de hasta 3 cm de espesor en las inmediaciones de la cabecera del dispositivo tras dos ciclos de recarga artificial. De acuerdo con este cometido, en el apartado 6.2.5 se ha llevado a cabo un primer estudio del grado de colmatación del acuífero, tras el primer ciclo de operatividad de las estructuras de recarga artificial.

Un impacto apenas registrado en la zona de estudio durante el primer ciclo de recarga, pero que representa una severa amenaza, son las **inundaciones**, impacto que genera la pérdida de cosechas y, en general, otros impactos socioeconómicos negativos. Una tipología especial de impacto por ascenso del nivel del agua se manifiesta en forma de impactos socioeconómicos (inundaciones de cuevas, bodegas, etc.). Las bodegas son estructuras insertas en la tradición popular de la zona, y su inundación trae consigo consecuencias psicológicas y una cierta aversión a las labores de AR. Otro elemento clave alterado es la inundación de elementos más funestos, como, por ejemplo, el cementerio de Villeguillo ha sufrido inundaciones al ampliar las obras hacia el norte en marzo de 2004, quedando algunos nichos familiares inundados, con consecuencias psicológicas y una sensación de malestar en algunos habitantes de la zona.

Las operaciones de AR incontroladas pueden contribuir a fomentar la **generación de unas condiciones hídricas perturbadas**, que se manifiesta en modificación de la red de flujo del agua subterránea y del quimismo de los procesos de interacción agua-suelo. Estos procesos son de carácter diferido, es decir, se manifiestan en forma de impactos con gran retardo frente a otros impactos de manifestación más rápida (Manzano, 2003).

Otro impacto socioeconómico está constituida por la enorme cantidad de **contratiempos técnicos y jurídicos** que es preciso solventar previamente a la ejecución de las obras (concentración parcelaria en la zona sur de la *Cubeta*, cierre o clausura de pozos que provocan descuelgues de aguas del acuífero superficial y ciertos contenciosos ajenos a la declaración de “*Obra de interés general*” que tienen estas actuaciones y a la Ley de expropiación forzosa.

Otra tipología son los “**Impactos derivados de cambios de usos del suelo**”. Esta alteración raramente afecta a la recarga, excepto si el nuevo uso es una zona regable (transformación en regadío) o un nuevo bosque (**forestación**). Las plantas perennes, como el pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.) tan abundante en la zona, emplean, según algunos autores, más agua que las caducifolias de ciclo anual porque deben mantener sus hojas verdes todo el año y su transpiración es mayor (Dillon & Pavelic, 1996). Por ese motivo las raíces serían más profundas. Cabe destacar que estos autores llegaron a esta conclusión en las circunstancias geoambientales de Australia del sur, mientras que algunos autores españoles defienden que la profundidad radicular es debida a que el sustrato es permisivo a la penetración y el agua se encuentra relativamente baja (Gómez y García, 2003).

La nueva zona radicular generada constituye un impedimento para la recarga natural. Según algunos autores, la intercepción del agua de lluvia es mayor en bosques de coníferas que otro tipo de bosques o unidades ambientales, oscilando la retención entre un 20 y un 40 % (*Zinke, 1967*). En zonas de cultivos y hierbas es mucho menor.

Un nuevo tipo de impacto de carácter diferido es el “**impacto en la vegetación nativa**”. La adición física de un volumen de agua mediante operaciones de AR conlleva un ascenso del nivel freático, beneficiando a las freatófilas que dependen de aguas de escorrentías periódicas. Los cambios en las condiciones de la humedad del suelo pueden provocar efectos negativos en la vegetación no hidrófila, especialmente en los pinares. También es viable, aunque no se ha detectado ningún caso por el momento, la recuperación de ciertos humedales desecados y forestados, actualmente insertos en el seno de los pinares, si las circunstancias hídricas son propicias.

La detección de zonas ocupadas por pinar que han sobrepasado la profundidad de alerta durante el primer ciclo de recarga, que está establecida en 2 m para este tipo de acuíferos (*Christen et al, 2001*), conlleva la necesidad de evaluar los posibles daños que puede causar la recarga artificial en los pinos resineros, considerados *vegetación nativa*, aunque según algunos autores se trate de una especie introducida en la zona. Esta afirmación es especialmente controvertida, dado que hay indicios para pensar que la presencia de pinos en la región se remonta a siglos atrás (fósiles de pinos en turberas e incluso capiteles con madera de pinos en el monasterio de Santa María la Real de Nieva, a 15 km escasos de la zona de estudio), aunque su rápida expansión en el siglo XX haya contado con la colaboración del hombre.

A este respecto se han consultado varios estudios específicos que tratan esta problemática, uno realizado para la comarca del Carracillo, también en el acuífero de Los Arenales, y varios para Australia del Sur, zona de clima mediterráneo bastante parecido al de la zona de estudio.

La relación de dependencia entre las clases de cubierta vegetal y la profundidad de la capa freática ha sido estudiada mediante la técnica de “*chi-cuadrado de Pearson*”, estadístico frecuentemente usado para comprobar si la relación existente entre dos atributos es significativa. El resultado obtenido ha sido de 506,77, a la que viene asociada un valor crítico de 0,001. Este resultado permite rechazar la hipótesis de independencia estadística y asegurar que ambos parámetros están relacionados (*Gómez y García, 2003*). En este estudio se obtienen varias conclusiones de la relación entre la cubierta vegetal y la ZNS. Cabe destacar:

- Los lugares sin cubierta arbórea aparecen asociados a isoprofundidades claramente inferiores a los 2 m, donde la proximidad a la superficie del nivel freático reduce considerablemente el espacio oxigenado para el desarrollo de los sistemas radicales de los pies arbóreos, limitando su adecuado desarrollo y llevando a su exclusión.
- Los rodales de pino resinero con mayor densidad aparecen íntimamente asociados a los valores de isoprofundidad superiores a 2 m, pudiéndose considerar, en una primera aproximación, que mayoritariamente se encuentran desconectados de los niveles freáticos.

- Las mayores frecuencias observadas aparecen entre los niveles de pinar de baja densidad e isopropiedades superiores a 4 m. La explicación de este resultado puede estar en la mayor presencia superficial de dos clases de suelos (CV e IP) típicos de crestas de las dunas eólicas que conforman predominantemente el territorio.

Otro artículo que representa un análisis más riguroso en condiciones climáticas parecidas (precipitación media anual entre 600 y 850 mm) fue realizado por *CSIRO Forestry and Forest Products División* (en Dillon et al, 1999) para el Sur de Australia. De acuerdo con este estudio, la clave es la evolución del agua almacenada en el suelo durante los distintos episodios del período vegetativo de las plantas, bien sea cultivos o bosque nativo (pinos y eucaliptos). Por ejemplo ciertas plantas hidrófilas en flor pueden soportar variaciones de 20 cm en el nivel del agua sin mostrar ningún tipo de afección (Roberts & Marston, 2000).

En el caso de producción maderera se obtuvieron resultados concordantes que llevaron a establecer la norma de plantar los nuevos ejemplares en zonas con un nivel freático situado a menos de **5 metros** de profundidad. El potencial máximo de utilización por las **masas forestales** de una tasa de recarga (natural e inducida) en unas condiciones climáticas húmedas, y una tasa de precipitación natural como la indicada, oscila potencialmente entre 1.100 y 1.400 mm sin crear efectos adversos en la masa forestal nativa (Mitchell and Correll, 1987; Ellis, 2001; Simmons et al, 2002).

Teniendo en cuenta que los niveles del agua en la zona oscilaban entre 8 y 13 metros, en los bosques destinados a producción maderera se llevaron a cabo operaciones de AR con el objetivo de conseguir una profundidad de la capa freática inferior a 5 m durante parte del ciclo vegetativo de la planta, para lo cual fue preciso incrementar en un 60 % la tasa de infiltración con respecto a la natural (de entre 33 a 125 hm³ pasó al intervalo de 53 a 202 hm³) (Cook, 1999). El aumento de la recarga en el bosque preexistente fue acompañado de un incremento en la plantación de 4 a 9%, modificando el balance hídrico regional entre un 20 y un 34 %, lo que representa un claro impacto sobre el uso del terreno.

Según el mismo estudio, en algunos sectores se detectaron daños en la vegetación de pino joven de unos cuatro años de edad cuando el nivel del agua se encontraba entre **2,7 y 3 metros** de profundidad y tasas de recarga por encima de 1.100 a 1.400 mm/año.

Como conclusión se desvela que el efecto adverso del nivel freático sobre las masas forestales depende del desfase entre la oscilación del nivel del agua y el ciclo vegetativo del pino, así como del balance hídrico del suelo, al no ser la infiltración constante a lo largo del año. Por tanto, la profundidad del nivel del agua es un indicador indirecto (que designaron PQ), siendo más influyente la humedad del suelo. En el estudio el pino demostró su capacidad para aguantar las consecuencias de sequedad edáfica como consecuencia de la extracción de agua en verano.

Para comprobar el grado de afección en la *Cubeta* se ha realizado un diagrama de dispersión confrontando los valores de salinidad con la concentración en cloruros de los piezómetros situados en los pinares n^{os} 4, 5, 10, 19 y 25 de la Red de Control de la Hidroquímica (RCH), con análisis disponibles de 1999 y 2003 (Fig. 4.36).

DIAGRAMA DE DISPERSIÓN CONDUCTIVIDAD-CLORUROS

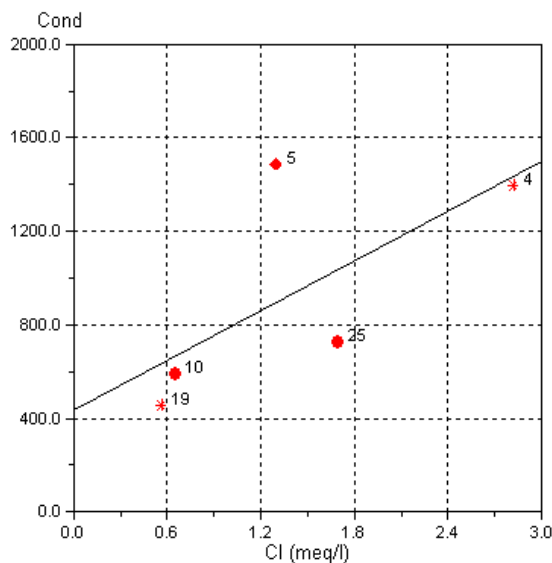


Fig. 4.36. Diagramas de dispersión que confrontan el balance de cloro con respecto a la acumulación de sal en los piezómetros de la RCH localizados en la UA forestal. Análisis realizados en 2003, fase sinoperacional.

La ecuación de la recta de regresión interpolada para los puntos ubicados en pinares de la RCH₀₃ es:

$$Y = 354 X + 434$$

A tenor de los resultados obtenidos, no se aprecia una tendencia a la salinización destacable del agua subterránea localizada en la unidad ambiental forestal con respecto a la localizada en la Unidad Ambiental de cultivos (Fig. 4.08).

A pesar de que el indicador presente dudosa fiabilidad en el ámbito australiano, no deja de ser un indicador excelente para el control de la influencia en las masas forestales en la zona de estudio.

Resulta preciso llevar a cabo labores de monitoreo y seguimiento de la recarga de larga duración, puesto que las experiencias de recarga en masas forestales son relativamente cortas.

Para ello se propone la elaboración de gráficas que confronten los datos climáticos obtenidos para una serie de años junto con la evolución en los piezómetros de observación emplazados en las masas forestales, utilizando como indicador el crecimiento vegetativo en los anillos de crecimiento del pino medido con barrena de Pressler en zonas piloto seleccionadas.

Aunque el pino sea la especie predominante en la zona, no debe dejarse atrás cualquier otro perjuicio a la vegetación y a los cultivos.

Los posibles impactos a los cultivos están condicionados más que por efecto de la recarga por efecto de los períodos de sequía, de carácter cíclico, que sin duda se presentarán.

La capacidad de regulación del acuífero difícilmente puede soportar dos años de sequía intensa al actual ritmo de extracciones. Además es previsible que se implanten nuevos regadíos en el sector tras la recuperación parcial del acuífero en el primer ciclo de recarga, recuperando 2 hm³ con respecto al déficit previo existente.

Desde el punto de vista de la gestión, la posibilidad de poder controlar el uso agrícola mediante la administración conjunta del acuífero y la concesión de aguas de origen superficial mejora el control del gasto.

6.1.4.1. *Impactos directos de la construcción de la infraestructura de recarga artificial*

Existe una serie de impactos derivados de la construcción de la infraestructura de recarga y de su mantenimiento, ampliación, etc. Por tanto, se considera procedente definir previamente las estructuras previstas de acuerdo con el proyecto de obra del MAPA de 1999.

La estructura de recarga superficial consta de tres elementos principales: azud y obra de toma, conducciones y obra de recarga, dispositivos descritos en el apartado 10.1 del Bloque 2. A éstos hay que añadir unas estructuras adicionales que conllevan una modificación del medio, destacando la construcción de un camino de servicio al lado del canal, de pasos elevados y de elementos extraños en forma de arterias primas, como son los módulos prefabricados de hormigón, tuberías de fibrocemento, acero corrugado para armaduras, etc.

Algunos de los impactos adicionales generados como consecuencia de la construcción del caz de recarga artificial AR son:

- Expropiaciones. Al tratarse de una obra de interés general, está regulada por el reglamento de expropiación forzosa.
- Movimiento de tierras, tales como desmontes y terraplenes, compactación de tierras, acopio de materiales, vertido de desechos, y los impactos inherentes a la actividad, tales como los derivados del transporte de materiales y movimiento de maquinaria pesada. Algunos de ellos tendrán un carácter permanente, irreversible y negativo en aquellos casos en que resulten afectados elementos singulares.
- Efecto barrera por creación de estructuras lineales con pasos elevados, tendido de la tubería de conducción, construcción del azud y del canal de recarga, etc.
- Residuos generados. Se pueden distinguir temporales y permanentes. Los primeros corresponden a materiales sobrante de excavaciones, la materia vegetal procedente de talas, podas y desbroces, el material de instalaciones deteriorado (tuberías rotas, etc.), la emisión de ruidos, polvo atmosférico y gases por combustión de maquinaria en los movimientos de tierra, etc. Entre los

permanentes cabe destacar la colmatación, principal impacto que afecta a las operaciones de AR.

- Trabajos de conservación (fase de explotación).

6.1.4.2. *Impactos indirectos previsibles*

Los impactos futuros pueden ser previstos adoptando la técnica propuesta por Rey Benayas (*en Rey Benayas 1992b*), que se apoyaba en los siguientes criterios (Fig. 4.37):

- Criterios relativos al contexto hidrogeológico.
- Criterios relativos al entorno ecoambiental y otros elementos relacionados con el acuífero (paisajístico, sociocultural, económico).
- Criterios relativos a la tipología y características de la explotación.

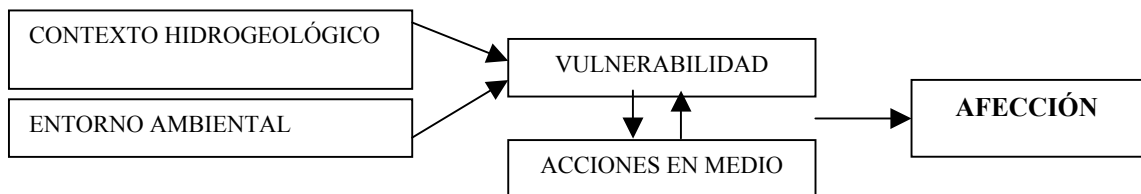


Fig. 4.37. Factores a tener en cuenta para prever impactos ambientales futuros en el medio basados en la variación de sus elementos constituyentes.

Una vez conocidos los distintos impactos que han operado en el medio tras dos ciclos de recarga artificial, es posible determinar su signo en base a los efectos directos e indirectos previsibles:

- Aprovechamiento de recursos hidráulicos excedentes (+).
- Formación de nuevas comunidades vegetales y faunísticas en torno al azud (+).
- Creación de nuevos humedales (+).
- Modificación del paisaje en torno al azud, por efecto de la presencia de la lámina de agua (+).
- Recuperación de humedales en la zona de recarga del acuífero, devolviéndolos a su estado natural (+).
- Rentabilización de las inversiones en instalaciones electromecánicas de los pozos de la zona (+).
- Recuperación del nivel económico y estabilización de la población en las zonas rurales afectadas (+).
- Modificación del régimen fluvial del río Voltoya (-).
- Modificación del nivel freático del río (-).
- Alteración de cubierta vegetal en la zona ocupada por el azud (-).
- Ocupación permanente por la conducción de suelos con especies arbóreas de raíz profunda (-).

- Perturbación de las comunidades faunísticas (-).
- Alteración de la cubierta vegetal en dispositivos de conducción, distribución, pretratamiento, etc. (-).
- Problemas de colmatación de los dispositivos de recarga (-).
- Producción de residuos de obra (-).
- Producción de materiales correspondientes al estrato colmatado del fondo del caz que deben ser lavados y reimplantados o retirados a vertedero durante el programa de mantenimiento (-).
- Actividades de limpieza y mantenimiento en la vía de servicio, con molestias diversas, cortes al tráfico, etc.

Una amenaza que puede constituir un impacto futuro en la zona de estudio es la **introducción de especies exóticas**. Hasta la fecha no se ha detectado de forma importante en la zona de la *Cubeta* ni del *Complejo*, aunque sí con baja escala y magnitud. No obstante, es un impacto potencial a tener en cuenta, dado que existen numerosos estudios relativos a la idoneidad de ciertas plantas para remover el fondo en los dispositivos de recarga artificial y minimizar la presencia de nutrientes, peces que realizan la misma función además de incidir en el oxígeno disuelto en las aguas, como es el caso del pez medaka (*Oryzias latipes*), praderas de macrófitos, etc.

Este impacto potencial, en caso de presentar una tendencia alcista, cabe esperar que provoquen impactos negativos en las comunidades acuáticas donde se instalan. Las mayores afecciones que se generan son: modificaciones del hábitat, competición por el espacio, predación, enfermedades, erosión genética, etc.

La introducción de especies alóctonas o exóticas porque cumplen "funciones" específicas entra en liza con la perspectiva de la mayoría de los ecólogos, según quienes puede haber especies autóctonas menos especializadas pero que desarrollen la misma función. El hecho de su posterior expansión y reducción de las poblaciones de especies autóctonas ya cuenta con varios y tristes ejemplos en la historia natural de España.

6.1.5. Resultados. Listados de identificación y chequeo de impactos

A tenor de todos los impactos ambientales identificados en las distintas fases de actuación, se han generado unos listados de revisión o chequeo propios para la identificación de los impactos asociados a las operaciones de recarga artificial (AR) y otra lista de control para identificar las acciones negativas que inciden en los humedales, especialmente en aquellos en los que sea previsible realizar labores de regeneración mediante AR, que es el objetivo pretendido.

Los **impactos** operantes tienen un claro **componente espacial y temporal**, y su aplicación quedará supeditada a una zona determinada del ámbito de actuación. Así, es preciso llevar a cabo una división zonal del entorno preoperacional, diferenciando una zona de *intervención* y otra de *actuación*, además de la temporalidad y **signo** de cada impacto.

Ante la dicotomía de emplear listados o matrices, se ha optado por la primera opción, dado que una matriz requiere confrontar los factores del medio con las acciones, mientras que en la fase preoperacional hay impactos operativos de otra índole distinta a

las operaciones de recarga artificial. Por tanto, la finalidad de emplear una matriz de acuerdo con los criterios básicos de ingeniería ambiental, queda suplida por el sistema de evaluación adoptado, basado en un sistema propio de indicadores, a los que se aplica un sistema de rangos-pesos que, finalmente, quedan reflejados en un polígono de evaluación multicriterio.

Estas listas no son exhaustivas. Más bien han sido diseñadas para este sistema específico, y su validez puede estar supeditada al grado de semejanza entre la zona de estudio y la zona a gestionar.

Cada factor de la lista de control debe ser considerado de acuerdo con su intencionalidad: validez de aplicación en la zona de intervención (ZI) o de actuación (ZA), y temporalidad, si bien puede haber solapamientos espaciales y temporales. Estos listados, divididos de acuerdo con su temporalidad, se presentan en el anexo 4.4.2, en un tomo independiente con objeto de facilitar su observación simultánea al texto. Su orden de presentación corresponde, respectivamente, a la fase preoperacional, sinoperacional y postoperacional. El orden de presentación es arbitrario en todos los listados.

Además de los citados, quedan numerosos impactos genéricos no contemplados en ellas, si bien puede servir para identificar impactos y acciones en cualquier escenario, sea análogo o no.

6.1.5.1. *Ficha de caracterización para la identificación de impactos en humedales*

Los listados de identificación de impactos son complementados con un listado específico para el estudio de los posibles impactos ejercidos sobre los humedales degradados que reciben intervención humana mediante operaciones de recarga artificial para fines medioambientales.

La ficha, de elaboración propia, ha sido realizada con la intención de permitir el chequeo de impactos operativos independientemente de la relación entre factores y acciones que subyace, criterio tenido en cuenta al realizar su evaluación. Al mismo tiempo, constituye el “punto de partida” donde queda recogida toda la información precisa para el seguimiento de su evolución a lo largo del tiempo, por tanto, además de impactos genéricos (agrupados por categorías) se han incorporado elementos identificativos y descriptivos.

Los grupos genéricos establecidos son nueve:

- 1). *Identificación*, recoge los aspectos relativos a la recopilación de información y materiales precisos para el estudio de cada humedal objeto de estudio.
- 2). *Características*. Quedan recogidos los datos y explicaciones relativos a su funcionamiento y estado actual, con cuantos datos técnicos se puedan recopilar.
- 3). *Morfometría*. Datos espaciales del humedal, cuyas variaciones relativas aportan una información valiosa acerca de su tendencia evolutiva.
- 4). *Espacios Naturales Protegidos (ENP)*. Presencia/ausencia y tipo.

- 5). *Actuaciones en el humedal*. Constatadas hasta la fecha en que queda registrado el “punto de partida” para el seguimiento de la evolución del humedal.
- 6). *Susceptibilidad vertidos*. Peligrosidad o riesgo de contaminación futura en base a la información disponible supeditada a los usos del suelo.
- 7). *Usos y aprovechamientos del medio*. Entendidos como actividades llevadas a cabo en el entorno.
- 8). *Uso público*. Entendido como el conjunto de infraestructuras de un medio para su disfrute.
- 9). *Datos administrativos*. Relativos al humedal y su espacio físico (particularidad privada, etc.).

La ficha de caracterización elaborada es la siguiente (Tabla 4.08):

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
CÓDIGO DEL LAGO/HUMEDAL	
TOPONIMIA	
UNIDAD ADMINISTRATIVA	
AUTONOMÍA	
LOCALIDAD	
HOJA 50.000	
CUENCA	
SUBCUENCA	
HUSO:	
COORDENADA X:	
Y:	
Z:	
TIPO	
FIGURA DE PROTECCIÓN	
FOTO AÉREA	
ORTOIMAGEN	
IMAGEN SATÉLITE	
FOTOGRAFÍA	
RESOLUCIÓN MDT DISPONIBLE	
ACCESO	
CARACTERÍSTICAS	
ORIGEN GENÉTICO	
HIDRODEPENDENCIA	
ACUÍFEROS RELACIONADOS	
SOBREEXPLOTADO SÍ/NO	
CONEXIÓN CON LA RED FLUVIAL	
EDAFOLOGÍA DEL ENTORNO	
FACIES HIDROQUÍMICA	
ANÁLISIS QUÍMICOS	
PERÍMETRO DE PROTECCIÓN	
VULNERABILIDAD	
VALORACIÓN PAISAJÍSTICA CONTINGENTE	
PRESENCIA DE VEGETACIÓN HIDRÓFILA	
PRESENCIA DE VEGETACIÓN NITRÓFILA	

MORFOMETRÍA	
EJE MAYOR	
EJE MENOR	
ESCALA DISPONIBLE	
COTA ESCALA	
PROFUNDIDAD MÁXIMA CUENCO	
Profundidad máxima	
Perímetro máximo (km)	
Anchura máxima (km)	
Longitud máxima (km)	
Superficie máxima (km ²)	
Bibliografía (antecedentes)	
ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS (ENP)	
LIC (LUGARES DE INTERÉS COMUNITARIO)	
ELEMENTO CULTURAL (PATRIMONIO HISTÓRICO)	
ZEPa (ZONA ESPECIAL PROTECCIÓN AVES)	
ZEPAS	
RAMSAR	
OTROS (AUTONÓMICO)	
ACTUACIONES EN EL HUMEDAL	
AFECTADO (TIPO DE AFECCIÓN)	
RELLENADO (AÑO)	
DRENADO (AÑO)	
CULTIVADO (ESPECIE)	
RODEADO POR	
REPRESADO (AÑO)	
EXCAVADO	
DRAGADO (AÑO)	
EXTRACCIONES ÁRIDOS	
REGULACIÓN	
EXTRACCIONES AGUA	
SUSCEPTIBILIDAD VERTIDOS	
URBANOS	
INDUSTRIALES	
AGRÍCOLAS	
TIPO AGROQUÍMICOS	
PESTICIDAS	
USOS Y APROVECHAMIENTOS DEL MEDIO	
PASTOREO	
ABREVADERO	
ABASTECIMIENTO	
EXTRACCIONES Y SALIDAS	
APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL	
OTROS USOS	
USO PÚBLICO	
RECREO	
ACUICULTURA	
URBANIZADO	

CAZA	
PESCA	
EDUCATIVO	
RECREATIVO	
MEDICINAL	
APROVECHAMIENTO VEGETACIÓN	
OTROS	
OBSERVACIONES USOS	
DATOS ADMINISTRATIVOS	
PROPIEDAD	
ADMINISTRACIÓN	
GRADO DE CONSERVACIÓN	
INSTRUCTOR/FUENTE	
OBSERVACIONES	
FECHA DEFINICIÓN	

Tabla 4.08. Listado de chequeo de los impactos ambientales identificados en humedales relacionados con operaciones de recarga artificial.

De este modo, una vez definido el estado del humedal para un momento determinado mediante el cumplimentado de esta ficha, es viable llevar a cabo un seguimiento del mismo que permita valorar si las actuaciones humanas operan en el sentido adecuado, en base al análisis de sus consecuencias. Dado que el carácter de la ficha es excesivamente sintético, la caracterización debe ir acompañada de cuantos anexos y “hojas en blanco” sea preciso.

El cumplimentado de la ficha no se ha llevado a cabo para la totalidad de los humedales inventariados, pero sí para los más representativos susceptibles de recibir agua para usos medioambientales, como son la Laguna de las Eras, La Laguna de la Iglesia y Caballo Alba, humedales que cuentan con figuras de protección (SG-01 a 03).

Las fichas resultantes se presentan en el anexo 4.4. “*Fichas de caracterización inicial de los humedales Laguna de las Eras, Laguna de la Iglesia y Caballo Alba.*”

6.1.5.2. *Ficha abreviada para la identificación de impactos en humedales relacionados con actividades de recarga artificial*

Dado que tanto las actuaciones y dispositivos de recarga artificial (AR) como los humedales forman parte de un “todo”, en el que todos sus elementos están interrelacionados; la *tabla de chequeo simplificada* 4.09 relaciona los humedales con las labores de AR de acuerdo con su temporalidad:

Impactos actuales	Impactos futuros
(ADEMÁS DE LOS IMPACTOS GENÉRICOS)	Inundación de tierras de cultivo y la anegación de las estructuras de recarga ante fuertes precipitaciones (-).
Afección a las redes de drenaje, al curso de los ríos, a sus márgenes y al régimen de funcionamiento (-).	Colmatación progresiva de los dispositivos (-).
Impacto paisajístico (-).	Impacto sociocultural (+/-).
Incremento de la evapotranspiración total (-).	Recuperación del nivel económico y estabilización de la población en las zonas rurales afectadas (+).
Posibilidad de conectar estratos en acuíferos	Impacto en el entorno ecoambiental (-).

multicapa (-).	
Descuelgue de agua de los niveles más superficiales hacia los inferiores del acuífero regional a través de sondeos, con efecto de reciclaje(-).	Aprovechamiento de recursos hidráulicos excedentes (+).
Reducción de caudales en manantiales, zonas de drenaje y captaciones (-).	Formación de nuevas comunidades vegetales y faunísticas en torno al azud (+).
Cambios en las relaciones aguas subterráneas / aguas superficiales, por generación artificial de nuevas canalizaciones y cauces (-).	Creación de nuevos humedales artificiales (+).
Problemas geotécnicos diversos (como hundimientos, desprendimientos en taludes, colapsos, etc.). (-).	Modificación del paisaje en torno al azud, por efecto de la presencia de la lámina de agua (+).
Incrementos de la turbidez, salinidad, sólidos en suspensión, Carbono orgánico disuelto (COD), así como en la temperatura del agua, con incidencia en la flora y fauna (-).	Recuperación de humedales en la zona de recarga del acuífero (+).
Afecciones a los cultivos por incremento de alcalinidad y salinidad en aguas subterráneas (-).	Rentabilización de las inversiones en instalaciones electromecánicas de pozos de la zona (+).
Movilización de fuertes concentraciones de iones salinos presentes en el medio (-).	Aterramiento de canales, presas, cauces artificiales y/o naturales (-).
Interacción con vectores orgánicos introducidos por el vertido de aguas residuales y de animales muertos enterrados en zona no saturada (ZNS) que se convierte en zona de oscilación (-).	Modificación del régimen fluvial del río Voltoya (-).
Alta concentración de nitratos y nitritos en zonas puntuales del acuífero (-).	Modificación del nivel freático del río incidiendo en la vegetación de ribera (-).
Alta concentración de metales pesados (arsénico y derivados alquílicos) en zonas puntuales del acuífero superficial (-).	Necesidad de realizar expropiaciones (-).
Desplazamiento de las especies sensibles a favor de especies más tolerantes, como el carrizo, por efecto de los procesos contaminantes (-).	Compactación de los limos del lecho del caz de recarga y disminución de la permeabilidad (-).
Desplazamiento de ciertas comunidades faunísticas (-).	Colmatación y erosión de los taludes del caz (-).
	Alteración de la cubierta vegetal en la conducción (-).
	Efecto barrera por creación de estructuras lineales con pasos elevados (-).
	Perturbación a ciertas comunidades faunísticas (-).
	Introducción de elementos extraños en el medio en la zona de la obra de toma, conducción y caz de recarga, como hormigón, como ladrillos, módulos prefabricados de hormigón, tubería de fibrocemento, acero corrugado para armaduras, etc. (-).
	Introducción de elementos extraños complementarios a la obra, como un camino de servicio al lado del canal, pasos elevados, etc. (-).
	Impacto paisajístico (-).
	Producción de residuos de obra temporales y permanentes
	Movimiento de tierras, desmontes, terraplenes, compactación por movimiento de maquinaria pesada (-).
	Aumento de la concentración de ión sodio motivada por la circulación de agua entre los distintos estratos de un acuífero multicapa y su concentración en las zonas más deprimidas de la Cubeta (-).

Tabla 4.09. Tabla de chequeo simplificada. Impactos ambientales identificados en la actualidad y previstos para el futuro que operan en los humedales y los dispositivos relacionados con operaciones de recarga artificial.

6.1.6. Seguimiento de la evolución de la recarga artificial, humedales y otros elementos

Una vez identificados los impactos es preciso establecer un sistema de evaluación y seguimiento de su evolución o vigilancia.

La vigilancia ambiental debe ser realizada por indicadores (*Gómez Orea, 1999*). El sistema de indicadores debe ser, en número, lo más reducido posible, y un mismo índice debe estimar varios factores (*EOI, 2000*).

Con estas premisas se ha elaborado un sistema de indicadores medioambientales específico, que se presenta en el apartado siguiente.

6.2. INGENIERÍA AMBIENTAL. DISEÑO DE UN SISTEMA DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES ESPECÍFICO

La evaluación y seguimiento de los impactos ambientales constituyen el segundo objetivo a cubrir dentro del epígrafe de ingeniería ambiental.

La evaluación es una etapa consecuente a las etapas previamente establecidas, que son la identificación de impactos y su cuantificación, ambos presentados en los apartados previos.

A continuación se presentan algunas nociones y criterios de aceptación general relativos a la EIA.

En la evaluación cabe determinar el "*índice de incidencia*", que permite determinar la severidad de dicha acción y forma de la alteración. Este índice está definido por la intensidad del impacto y por una serie de atributos de tipo cualitativo que caracterizan dicha alteración" (*Gómez Orea, 1999*). Este índice oscila entre 0 y 1, según su diseño inicial. Su cálculo puede ser realizado con carácter informal o bien mediante cuatro pasos o etapas establecidos para los estudios EsIA de corte clásico, que son:

- Tipificar las formas de cada atributo. Por ejemplo, el momento de máxima intensidad del impacto, su recuperabilidad, etc. (*Larry & Canter, 1998*).
- Atribuir un código numérico a cada forma de impacto (máximo a la más desfavorable y mínimo a la más favorable).
- Determinar la magnitud para cada impacto.
- Estandarizar un valor de magnitud entre 0 y 1 para ámbitos de actuación, que podrían corresponder a unidades homogéneas de impacto ambiental en el territorio, bien sean unidades ambientales, unidades hidroambientales, etc.

El empleo de esta fórmula debe permitir calcular el valor de cada impacto. El siguiente proceso será totalizar los valores correspondientes a niveles intermedios, indicadores de la intensidad y magnitud de los distintos impactos en la zona de estudio. Su evolución debe ser controlada mediante el estudio de indicadores medioambientales de la evolución en el tiempo.

Algunos de los factores a tener en cuenta **por el evaluador** en el proceso de EIA, de acuerdo con el RD 6/2001 de Evaluación de Impacto Ambiental deben ser, por lo menos, los siguientes:

- Afecciones sobre el funcionamiento hidrogeológico inicial.
- Sobre los recursos hídricos y mineros.
- Sobre la calidad del agua.
- Sobre elementos ambientales relacionados con el acuífero (fauna, flora, vegetación (incluyendo cultivos), suelo).
- Sobre el aire.
- Sobre los elementos socioeconómicos (generación de puestos de trabajo, etc.).
- Sobre los elementos paisajísticos.

- Sobre los elementos culturales, especialmente los que componen el Patrimonio Histórico Español.
- Sobre la población humana por ruidos, vibraciones, olores, emisiones gaseosas, etc.
- Sobre otras actividades o aprovechamientos del entorno.

Una vez aplicada esta metodología, conviene llevar a cabo un “*tratamiento de la incertidumbre*” o análisis de errores de la efectividad del diseño propuesto (Gómez Orea, 1999; EOI, 2000).

Tanto el sistema de Evaluación (EIA) propuesto como su seguimiento se basan en la adopción de un sistema de indicadores medioambientales y su parametrización.

Existen dos sistemas principales que establecen los criterios para el diseño de indicadores, cuyo marco teórico a su aplicación fue presentado en el apartado 3 (estado del arte)

6.2.1. Diseño y aplicación de un sistema de indicadores de impacto ambiental

De acuerdo con los antecedentes consultados y el análisis de la legislación, actualmente no hay establecida una metodología específica de implantación de indicadores, ni de cómo se deben sopesar las variaciones de los distintos indicadores.

No obstante, parece quedar establecido de manera explícita que debe adoptarse un sistema rangos-pesos, atribuyendo un peso determinado según cada caso concreto.

Este apartado parte con el objetivo de diseñar un sistema de indicadores medioambientales que contribuyan al diseño de adecuados programas de vigilancia y control ambiental enfocados al “Buen Estado de las Aguas” (BEDLA) en acuíferos arenosos.

Los indicadores ambientales han sido diseñados conforme al principio de causalidad (causa-efecto) entre los impactos identificados en distintas fases y las consecuencias previsibles, algunas de ellas difícilmente perceptibles, y generalmente negativas y acumulativas o incluso sinérgicas.

El indicador es dinámico por definición, al marcar la evolución de una tendencia en el tiempo. Su diseño permite minimizar la alta carga de subjetividad de algunos indicadores, en aquellos aspectos más dependientes de la percepción y formación de los técnicos que los diseñen, ya que los sistemas de indicadores persiguen la objetividad.

El diseño de indicadores persigue la sostenibilidad del sistema. Lo más importante son los objetivos medioambientales que se persiguen, resultando cada indicador como una herramienta para la consecución de tal objetivo.

Los indicadores medioambientales diseñados permitirán vigilar la evolución del acuífero, el seguimiento de la recarga artificial, y cómo está influyendo en los ecosistemas asociados: humedales, pinares, etc.

Los indicadores funcionarán como *sensores* y quedarán integrados como alternativas en el diseño de un *Programa de Vigilancia y Control Ambiental de un sistema de recarga*. Esta labor queda culminada con el diseño de un variograma dinámico, pluridisciplinar y posiblemente interactivo, que pueda ser generado automáticamente a partir de ciertos parámetros. Éste deberá reflejar aspectos cuantitativos, cualitativos, evolutivos, ecológicos, etc., así como la evolución de las aguas presentes en la *Cubeta*, sea cual sea su procedencia.

El sistema adoptado para su diseño ha sido el “Presión-Estado-Respuesta (PER), dada su alta causalidad y sensibilidad ante escasas variaciones (si el diseño de los indicadores es correcto), y su escasa idoneidad para dar cabida a la subjetividad. Otro criterio es la confusión en las directrices de aplicación del sistema DFPSIR.

Algunos de los indicadores de presión y de estado son de aceptación internacional, con ligeras modificaciones para su aplicación al ámbito específico de la Cubeta de Santiuste. Por ejemplo, el indicador de intrusión marina para medir la salinización de las aguas será reemplazado por un indicador de intrusión salina continental, de acuerdo con la definición planteada en el LBAS (*MOPTMA-MINER, 1994*) y en el LBAE (*MIMAM, 2000b*).

Otros indicadores “*de diseño*” adoptados por su idoneidad son: Acuíferos contaminados por nitratos, ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos, índice de calidad general (*ICG*), caracterización de la vulnerabilidad (índice *CRIPAS*).

Los casi 20 restantes son inéditos: evaluación del grado de turbidez y sólidos disueltos, nivel del agua en los piezómetros de observación de la evolución de la recarga, diferencia de cota entre el nivel freático y el nivel del agua en los humedales en cada *Unidad Hidroambiental* y el porcentaje de arcilla en el suelo.

Los indicadores propuestos son “*intencionales*”, cuya aplicación y calibración deberá realizarse tras comenzar las operaciones de recarga y estudiar la respuesta del medio.

La validación del sistema de indicadores diseñado y presentado más adelante requiere que sea llevado a cabo un seguimiento plurianual que, hasta la fecha, ninguna empresa o administración ha realizado en la zona de estudio.

A continuación se presentan algunos de los rasgos y finalidades más importantes de estos grupos de indicadores. En el próximo apartado serán especificados a nivel de detalle.

A). Indicadores de presión

Los indicadores de presión son diseñados para la medición de las repercusiones de la actuación, por tanto, se miden sobre la **actuación**. De este modo es posible conocer si las relaciones causales estímulo-respuesta derivadas de las actuaciones se ajustan a las previsiones, o bien si constituyen peligrosidad o riesgo (*EPA, 1997*).

Los indicadores de presión valoran la magnitud del impacto ambiental tras la aplicación de determinadas actuaciones, por tanto, no se miden en el medio, sino en la

actuación. Se han elegido los siguientes: contaminación puntual y difusa, las extracciones significativas de agua y pérdidas en los sistemas de distribución, la incidencia de la regulación del volumen de recarga, la identificación de las alteraciones cualitativas de las masas de agua y otros tipos de incidencia antropogénica significativa en el estado de las aguas superficiales y subterráneas, generalmente provocados por los distintos usos del suelo.

A este respecto resulta precisa la “identificación de conflictos actuales o futuros entre el aprovechamiento de aguas subterráneas y la conservación de ecosistemas acuáticos (Llamas, 2001). Estos conflictos representan un problema social y económico de primer orden en el seno de la sociedad española.

B). Indicadores de estado

Los indicadores de estado permiten evaluar el grado de afección que producen los impactos identificados sobre el **medio**. Permiten cuantificar la “respuesta de la actuación”. Son los indicadores más utilizados y los principales al elaborar un polígono de evaluación multicriterio (MIMAM, 1997).

Estos indicadores advierten de situaciones anómalas que se deriven de las previsiones establecidas, y constituyen una herramienta de toma de decisiones para, por ejemplo, poner en marcha un *programa de emergencia* si las previsiones se desviarán de la realidad por encima del intervalo de tolerancia.

Estos indicadores tienen un período de inicio muchas veces indeterminado, ya que existen muchos impactos indirectos y sinérgicos que tardan en manifestarse un período de tiempo elevado. Por este motivo la determinación de los indicadores estará basada en experiencias previas conocidas y suficientemente probadas y en el tratamiento de la información obtenida en las fases anteriores.

La transmisión de estos indicadores en tiempo real facilita las labores de gestión. Por ello es recomendable contar con dispositivos telecomandados de volcado automático de datos vía GSM o similar, el acceso a la información por Internet o por sistemas que puedan surgir en el marco de las mejoras técnicas disponibles.

El estudio de las relaciones paramétricas que reflejan tendencias evolutivas cobra especial importancia, ya que permiten aplicar técnicas específicas para el estudio de la variación de los parámetros en el tiempo. La técnica más viable y que ha dado buenos resultados es el análisis factorial mediante matrices de correlación, de modo que los correlados sean independientes, no redundantes y sean omitidas duplicidades y redundancias (Rey Benayas et al, 2003).

El inventario de humedales hidrodependientes degradados cobra especialmente sentido en esta etapa, al ser empleados como indicadores medioambientales con vistas a una futura restauración. Los bodones y pequeñas charcas salinas, además de funcionar como piezómetros e indicadores medioambientales de estado, podrán recobrar su valor ecosistémico previo a la implantación del regadío y de otros agentes y procesos impactantes. Su regeneración hídrica con aguas que permitan mantener su calidad originaria permite evitar la tentación de generar lagunas artificiales de agua dulce.

Una vez conocidas la características y funcionamiento de los bodones actualmente secos o desecados se plantea una recuperación mediante recarga artificial estimulada o inducida con excedentes hídricos de la época lluviosa, estudiando la procedencia de crear balsas de infiltración de agua dulce sobre un sustrato salino, o a una distancia determinada, para “inducir” una cierta salinidad al agua infiltrada.

El proceso parece ser viable a base de forzar la dirección de las líneas de flujo mediante el bombeo de pozos situados en puntos específicos que provoquen un “*efecto de llamada*”, o ubicando las instalaciones una vez conocida la orientación de las equipotenciales en el “*campo de bombeo*” en diferentes etapas y épocas del año.

El estudio de la tendencia evolutiva debe conseguir una composición parecida a la del agua que originariamente ocupaba estos humedales (en general salina y de flujos regionales) mediante técnicas de estimulación y pretratamiento de flujos locales.

En principio se propone diseñar unos indicadores de estado a partir de la caracterización hidrogeológica del acuífero previa a la recarga. Las fases técnicas inicialmente planteadas para la consecución de este objetivo son las siguientes (*en Fdez. Escalante, 2002a*):

- Actualización del catálogo de bodones presentes en la zona de estudio cuyo funcionamiento depende de su conexión con acuíferos.
- Planteamiento de una ficha que recoja una descripción precisa del entorno preoperacional de los humedales hidrodependientes.
- Listado y posicionamiento de las obras y actuaciones antrópicas y estudio de su posible interacción sobre los humedales mediante sistemas de información geográfica.
- Planificación de un programa de seguimiento y control de la evolución de los mismos mediante una serie de indicadores medioambientales.

Una posibilidad adicional en caso de considerarse positivo y viable recuperar estos humedales sería el empleo de aguas subterráneas, no exclusivamente excedentes hídricos.

También se puede prever el riesgo que representa la recarga sobre los humedales preexistentes convertidos en terrenos cultivables.

Otros elementos clave a tener en cuenta son:

- Posible afección a las masas forestales (pinares), como consecuencia de la alternancia intranual de depresión (bombeo) y elevación (recarga) del nivel freático.
- Posible incidencia de la depresión de la capa freática en la textura y estructura de la formación detrítica cuaternaria (procesos de compactación y subsidencia) y posibles daños generados al interaccionar con el sistema social, como procesos de

hinchamientos, hundimientos, etc. que afecten a construcciones, vías de comunicación, , etc.

Toda operación de recarga artificial se encuentra supeditada a la disponibilidad de agua para su derivación. Por tanto, cualquier sistema indicativo debe partir de este primer condicionante, adquiriendo la nulidad en aquellos años en los que la derivación de agua desde el cauce del río Voltoya sea inviable, por efecto de la sequía y por salvaguardar el caudal ecológico. En este caso debe haber un sistema de indicadores opcional que permita seguir la evolución del sistema en períodos de sequía.

Gran parte de los indicadores de estado están diseñados para la detección de las sequías y evaluación de su gravedad. El primer indicador de cierta elaboración fue desarrollado por Palmer en 1965 (*en Hayes, 1999*). Actualmente han sido diseñados más de 150. Un buen indicador debe tener en cuenta los datos meteorológicos e hidrológicos, permitir un cálculo fácil, que se resuma con un simple número y que sirva de herramienta para la toma de decisiones de forma rápida y sencilla (*Llamas, 2001*).

A este respecto, el problema del cambio climático subyace en la toma de decisiones por parte de las Administraciones involucradas en la gestión hídrica. Cabe esperar que la temperatura media del planeta ascienda de 0,5 a 3° C en los próximos decenios, si bien su influencia en la recarga de acuíferos y en la producción de biomasa resulta poco conocida en la actualidad (*Llamas, 2001*).

Desde el punto de vista de la planificación, parece necesario considerar escenarios que tengan en cuenta la existencia de períodos de sequía, con objeto de prever la utilización conjunta o alternada de aguas superficiales y subterráneas, con todas sus implicaciones técnicas, legales, institucionales, económicas y de calidad.

Cabe esperar además que los ciclos de sequías e inundaciones influyan malogrando los sistemas de distribución y de recarga artificial (problemas originados por desuso, aterramiento, etc.).

Previsiblemente gran parte de las innovaciones tecnológicas futuras contribuirán eficazmente a la gestión hídrica, tanto para aguas superficiales como subterráneas

El segundo gran objetivo propuesto, la restauración de humedales mediante operaciones de AR, requiere un nuevo sistema de indicadores específico, definido en el apartado siguiente.

La disponibilidad de fichas consecutivas constituye un sistema de indicadores medioambientales, y refleja diversos aspectos relacionados con sus propiedades (indicador medioambiental de respuesta). La comparación de fichas rellenadas en etapas distantes permitirá prever cómo ha sido su evolución.

C). Indicadores de respuesta

Los indicadores de respuesta permiten valorar las medidas agroambientales aplicadas conjuntamente con las actividades de recarga artificial. Son, por tanto, acciones que provocan una mejora del estado.

Su aplicación precisa de una entidad u organismo que financie las actuaciones, generalmente las Comunidades Autónomas o la Administración General del Estado.

En principio, los tres tipos de indicadores pueden ir acompañados de índices y parámetros específicos, culminando en el diseño de un sistema de indicadores calibrado y con un registro suficientemente largo para estudiar la evolución hidrogeológica y ecosistémica del ámbito de actuación. Éstos podrán ser modificados a medida que varíen las condiciones de referencia y la tendencia evolutiva.

Una vez presentadas las nociones principales se propone un sistema que consta de los siguientes indicadores:

6.2.2. Indicadores medioambientales de estado

Los indicadores básicos se presentan a continuación. Algunos corresponden a indicadores “tradicionales”, mientras que otros pretenden adaptarse a las mejoras técnicas disponibles más modernas. El sistema de rangos-pesos propuesto es inédito.

- **Ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos (índice BMWP) (indicador A3 del MIMAM)**

Se basa en la identificación de invertebrados con un valor adjudicado entre 1 y 10 (1 para familias que viven en aguas muy contaminadas y 10 para aquellas que no toleran la contaminación). La suma del valor para cada familia en un punto de muestreo da su grado de contaminación. Este indicador se aplicaría tanto en la zona de derivación del caudal de recarga del río Voltoya como en los humedales que se pretende regenerar, midiendo así la evolución de su valor ecosistémico y biodiversidad.

De acuerdo con el indicador A3 del MIMAM (1997) se distinguen los siguientes baremos de calidad:

- Mayor de 120: Aguas muy limpias.
- De 101 a 120: Aguas no contaminadas de modo sensible.
- De 61 a 101: Efectos evidentes de la contaminación.
- De 36 a 60. Aguas contaminadas.
- De 16 a 35: Aguas muy contaminadas.
- Menor de 15: aguas fuertemente contaminadas.

El indicador BMWP' está específicamente diseñado para la Península Ibérica, y se basa en la presencia o ausencia de una familia determinada, por lo que podría ser utilizado en un sistema rangos-pesos, tal que:

RANGOS	PESOS
PRESENCIA	0
AUSENCIA	100

Número de medidas/tiempo: 2, invierno y verano

- **Índice de Calidad General (índice ICG) (A4 MIMAM)**

Indicador de calidad de las aguas definido por el porcentaje de estaciones con un ICG medio anual superior a 75 (calidad buena). Este índice resulta del agregado de 23 parámetros. El ICG se obtiene matemáticamente a partir de una fórmula de agregación que integra 23 parámetros de calidad de las aguas [9 básicos (X) y 14 complementarios (Y)]. Los básicos son necesarios en todos los casos. Los complementarios sólo se usan para aquellas estaciones o períodos en los que se analizan. A partir de formulaciones matemáticas que valoran, a través de ecuaciones lineales, la influencia de cada uno de

estos parámetros en el total del índice se deduce un valor final que se sitúa necesariamente entre 0 y 100.

Se pueden establecer cinco categorías:

- 100-85: Excelente (E)
- 85-75: Buena (B)
- 75-65: Intermedia (I)
- 65-50: Admisible (A)
- 50-0: Inadmisible (i)

Se considera positivo el incremento. El indicador no es muy sensible a la mejora de la calidad por depuración (DBO y DQO).

Número de medidas/tiempo: 2, invierno y verano

La instalación a finales del año 2002 de una estación del Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (red SAICA) en el cauce del río Eresma en la localidad de Villeguillo (estación A-70 de la CHD), (Figs. 4.38 a y b), permitirá el control los parámetros necesarios para el seguimiento del indicador.



Figs. 4.38. a) y b). Estación SAICA A-70, río Eresma en Villeguillo.

• Acuíferos contaminados por nitratos (A1 MIMAM)⁸

El indicador se deriva de tomar muestras de concentraciones de nitratos (mg/l) en los puntos de la Red de Control de la Hidroquímica (RCH). A nivel nacional, el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCT), a través del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), y el Ministerio de Medio Ambiente, a través de los “organismos de cuenca” como la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), tienen implantada una red de control de la concentración de nitratos en las aguas subterráneas, indicador de la contaminación difusa y extensiva por efecto de fertilizantes agrícolas y la tendencia de

⁸ El Ministerio de Medio Ambiente publicó en 1996 la monografía “Indicadores ambientales. Una propuesta para España”, en la que se sientan las bases del Sistema Español de Indicadores Ambientales. La propuesta recoge la idea de medio ambiente como preocupación, adoptando el marco causal de la OCDE. Los indicadores se organizan por problemas identificados dentro de las distintas áreas temáticas abordadas: Atmósfera, Residuos, Medio Urbano, etc. Resulta en total un conjunto de 79 indicadores dentro del modelo causal que pretende sintetizar la situación del medio ambiente en España.

su evolución. El punto N-81 de la red de control se encuentra en Villeguillo (punto de agua 71 del inventario presentado en el anexo 2.1).

El porcentaje de acuífero contaminado por nitratos se calcula como el número de puntos con un contenido en nitratos superior a 50 mg/l, dividido por el número de puntos controlados y por la superficie de la zona de estudio.

$$\text{Superficie contaminada (\%)} = \left(\frac{\text{n.º puntos con más de 50 mg/l de nitratos}}{\text{n.º de puntos controlados}} \right)$$

El indicador crece a medida que lo hace la red de control, por lo que es válido para una red fija durante un período de tiempo significativo. En principio, se propone el seguimiento de la RCH ya establecida (*MAPA, 1999a y 2003*), compuesta por 28 puntos de agua, a los que cabe añadir 6 nuevos puntos correspondientes a los humedales inventariados en el invierno del año 2002 con presencia de lámina de agua.

Se propone el siguiente sistema rangos-pesos:

RANGOS	PESOS
0-100	25
101-150	50
151-200	75
> 201	100

con dos determinaciones anuales: invierno y verano

Todas las estimaciones realizadas con estos indicadores deben ser interpretadas con precaución debido a que no todos los resultados provendrán directamente de los regadíos, y debido a la dificultad de definir las zonas vulnerables de manera que en ellas no exista contaminación achacable a otras prácticas de uso del suelo.

• Caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación difusa (CRIPTAS)

El indicador *CRIPAS* (*IGME, 1998*) inicialmente fue desarrollado para estudiar la vulnerabilidad ante pesticidas y plaguicidas, y, por ende, puede ser empleado para agroquímicos que generen contaminación difusa.

El cálculo se realiza en base a siete parámetros, que son:

- C.- Conductividad hidráulica del acuífero.
- R.- Recarga neta.
- I.- Impacto en la zona no saturada, en función de la litología y nivel del agua.
- P.- Profundidad del nivel del agua.
- T.- Topografía/pendiente.
- A.- Roca del acuífero.
- S.- Tipo de suelo.

Una vez conocida la recarga neta en cada unidad homogénea en que ha sido dividida la Cubeta de Santiuste, podría ser utilizado un nuevo sistema rangos-pesos para el tratamiento distribuido de cada unidad, por ejemplo:

RANGOS (CRIPTAS)	PESOS
0-100	25
101-150	50
151-200	75
> 201	100

Número de medidas/tiempo: 1 (verano).

El sistema de cálculo es descrito a continuación:

- 1). *Conductividad hidráulica (C)*. Para la zona nuestra se le aplica un valor de 2, que corresponde con el intervalo 4-12, medido en m/día.
- 2). *Recarga neta (R)*. Para la zona nuestra se le aplica un valor de 1, que corresponde con el intervalo 0-50, medido en mm.
- 3). *Impacto de la zona no saturada (I)*. Para la zona nuestra se le aplica un valor de 6, que corresponde con el rango de arenas y gravas con limo y arcillas.
- 4). *Profundidad del nivel de agua (P)*. Para la zona de estudio se le aplica un valor de 6, que corresponde con un valor medio entre los intervalos 5-10 y 10-15.
- 5). *Topografía (T)*. Para la zona se le aplica un valor de 10, que corresponde con el intervalo 0-2 % de pendiente.
- 6). *Roca del acuífero (A)*. Para la zona de estudio se le aplica un valor de 8, que corresponde con el rango de arenas y gravas.
- 7). *Tipo de suelo (S)*. Para la zona nuestra se le aplica un valor de 9, que corresponde con el rango de arenas.

Todos estos factores son variables dependientes, por tanto, interactúan entre sí.

La ecuación para determinar este índice es:

$$\text{Contaminación CRIPTAS potencial} = a_C P_C + a_R P_R + a_I P_I + a_P P_P + a_T P_T + a_A P_A + a_S P_S$$

donde :

- a_i = valores dentro de cada rango.
- P_i = pesos relativos de cada factor.
- subíndices = factores *CRIPTAS*.

Cuanto mayor sea el índice CRIPTAS mayor será la vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

Según la caracterización inicial realizada, de acuerdo con los valores medios del acuífero, el indicador tiene un valor de 151, lo que representa una ligera diferencia con respecto al cálculo realizado (en *MAPA, 1999a*), donde resultó un valor de 161 (intermedio).

Este resultado debe ser considerado global para la zona de estudio. No se ha considerado procedente sectorizar la zona en subzonas con distinta vulnerabilidad a la contaminación por plaguicidas, como consecuencia de la gran homogeneidad de los materiales y escasa variabilidad de los factores. No obstante, es de prever que en las inmediaciones de Villeguillo el índice será ligeramente superior por la intensa aplicación de agroquímicos a los cultivos.

- **Acuíferos salinizados por intrusión salina continental (A2 MIMAM modificado)**

El indicador inicialmente fue diseñado como indicador de la intrusión marina (A2 del MIMAM), posteriormente para controlar la intrusión salina continental (A2 modificado) (*RD 329/2002, PNR*). En este caso se pretende controlar la salinización por disolución de sales del acuífero, reciclaje de aguas de riego, infiltración en zonas de pinar con incremento de la salinidad, efecto del vertido de aguas residuales, etc.

El indicador debe ser evaluado en el acuífero, no en las estructuras de recarga.

Se define como la superficie del acuífero con un contenido de cloruros superior a 250 mg/l respecto a la superficie total. La extensión del área salinizada se calcula mediante la expresión:

$$\text{Superficie salinizada (\%)} = (\text{n.º puntos con más de 250 mg/l de cloruros} / \text{n.º de puntos controlados}) \times \text{Superficie}$$

Podría ser utilizado en un sistema rangos-pesos, por ejemplo:

RANGOS	PESOS
0-100	25
101-200	50
201-500	75
> 500	100

Número de medidas/tiempo: 2, invierno y verano.

Algunos de los indicadores adicionales no recogidos en la bibliografía diseñados para tal ámbito de actuación son:

- **Salinización del acuífero**

El indicador es similar al anterior, ahora bien, el origen de la salinidad no procede de intrusión salina, sino de salinización de las aguas subterráneas.

- **Evaluación del valor de la turbidez y total de sólidos disueltos (TSD) en el agua de recarga**

La determinación del grado de turbidez del agua de recarga en las caceras de recarga artificial superficial incide directamente en la infiltración. Para ello es preciso controlar la calidad real del agua tras ser tratada por los dispositivos, tales como plazoletas de decantación y filtros. Para ello se propone establecer estaciones de medida distanciadas como mucho dos kilómetros, en las que se realizará la determinación directa del TSD. El sistema rangos-pesos inicialmente propuesto es:

RANGOS	PESOS
0-10 ppm	25
10-20 ppm	50
20-30 ppm	75
> 30 ppm	100

Número de medidas/tiempo: quincenal.

Hasta la fecha solo hay tres análisis de la calidad del agua de recarga realizados en el dispositivos de entrada.

- **Nivel del agua en los piezómetros de observación**

El indicador se aplicará sobre los 41 puntos de la red de control de la piezometría (RCP) y los 44 puntos de la red de control de la recarga (RCR) (indicador de estado y de respuesta respectivamente). Este indicador quedará definido como la diferencia entre el nivel freático del punto de agua y de la cota del agua de recarga.

Al considerarse la recarga un vertido, se ha estudiado la procedencia de acuerdo con la legislación vigente, especialmente con la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos. El resultado de la investigación es que la recarga artificial puede ser considerada un vertido *sensu lato*.

El indicador será dependiente de la capacidad de infiltración media en cada unidad hidroambiental (UHA) en que ha sido dividido el entorno preoperacional.

Diferencias menores de dos metros (*profundidad de alerta* en acuíferos de este tipo) (*Christen et al, 2001*) implican un cierto riesgo de inundación ante algún fenómeno meteorológico adverso. Esta diferencia de niveles (rangos) podría equipararse a un grado de riesgo (pesos). En zonas de permeabilidad alta se aplicará un factor de ponderación.

El rango de oscilación de la capa freática para el primer período de recarga alcanza un valor inferior a 8 metros, lo que permite definir el intervalo superior de los rangos.

El ejemplo propuesto sería el siguiente para una unidad hidroambiental (UHA) de permeabilidad media.

RANGOS	PESOS (K media)	Factor ponderación
>4 metros en la vertical	25	
3-4	50	x 2 si $10 < K < 100$
2-3	75	x 3 si $100 < K < 1000$
< 2	100	

El factor de ponderación sería el doble si la permeabilidad es alta, y el triple si es muy alta (de acuerdo con el baremo de Villanueva e Iglesias, 1984, presentado en el Anexo 2.6).

Número de medidas/tiempo: quincenal durante el período de recarga. Trimestral el resto del año.

- **Diferencia de cota media entre el nivel freático y el nivel del agua de recarga en cada Unidad Hidroambiental (UHA)**

El indicador se aplicará en cada una de las unidades hidroambientales UHAs definidas, considerando la *distancia media* de la superficie freática con respecto al agua de recarga. El indicador es parecido al anterior, pero considera superficies en lugar de datos puntuales, aplicando el mismo sistema rangos-pesos, un factor de ponderación similar y la misma cadencia.

- **Porcentaje de finos en el suelo. Indicador inicial de la colmatación**

A mayor cantidad de arcilla en el medio receptor es previsible una menor capacidad de infiltración. La determinación inicial en el medio receptor condicionará la capacidad de acogida del medio. En principio se propone aplicar granulometrías medias en muestras tomadas en puntos elegidos al azar dentro de cada unidad homogénea, que serán las unidades de gestión a efectos de recarga. Este indicador introduce el indicador de respuesta: *alteraciones en los parámetros hidrogeológicos por efecto de la colmatación*.

RANGOS	PESOS
0-5%	25
5-10%	50
10-20%	75
>20%	100

Número de medidas/tiempo: mensual durante el período de recarga. Una granulometría adicional en el período estival durante las labores de mantenimiento y limpieza del dispositivo.

Con estos indicadores es posible determinar el entorno preoperacional y llevar a cabo el seguimiento de las principales afecciones previsibles, como son los cambios en los flujos subterráneos, variación de recursos hídricos del acuífero, variación de caudales en humedales, zonas de drenaje y captaciones, cambios en las relaciones aguas subterráneas / aguas superficiales, incremento de la evaporación en las masas de agua superficial de los

bodones, alteraciones en la calidad hidroquímica, variaciones en la concentración de nutrientes y de procesos contaminantes, etc.

En el caso concreto de la recarga de la Cubeta de Santiuste, carente de un patrón de calidad del agua de recarga en el entorno preoperacional, requiere la determinación de éste, es decir, es preciso que queden establecidas unas características mínimas que deben cumplir las aguas de recarga. Esta tarea es desarrollada en el apartado 4.2.3. del Bloque 5, “*estándar de calidad para las aguas de recarga artificial*”.

Este grupo de criterios debe tenerse muy en cuenta para evaluar la magnitud de las afecciones y establecer límites y alternativas de explotación que reduzcan la afección al acuífero.

6.2.2.1. *Cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de estado*

Una vez conocidos los resultados de los distintos indicadores, se lleva a cabo el cálculo del índice para el período de recarga considerado. Todos aquellos con más de un cálculo anual son promediados, de modo que el valor final será la media aritmética de las sucesivas mediciones.

La tabla de cálculo se presenta en el anexo 4.5.2, así como su aplicación a dos humedales del *Complejo*, seleccionados por ser los que cuentan con mayor probabilidad de regeneración, que son la Laguna de la Iglesia y de las Eras, en Villagonzalo de Coca.

6.2.3. Indicadores medioambientales de presión

Los indicadores propuestos se basan en las experiencias obtenidas tras un ciclo de AR (año hidrológico 2002/03) y el inicio del segundo ciclo, hasta la primavera de 2004. En este período se ha podido deducir nuevos indicadores de presión con respecto a los establecidos previamente al inicio de las labores de recarga, así mismo se han podido establecer los rangos de acuerdo con el comportamiento del acuífero estudiado en el segundo bloque del trabajo de investigación.

El grado de conocimiento actual de la respuesta del acuífero está condicionado por la información específica disponible hasta la fecha, si bien cabe la posibilidad de que éstos deban ser modificados en el futuro a medida que se obtenga nueva información relativa a la respuesta del sistema ante la recarga artificial tras un período de observación mayor de un año hidrológico o ciclo de recarga.

Algunos de los impactos operativos en la actualidad tenidos en cuenta a la hora de establecer el sistema de indicadores de presión son la contaminación de fuente puntual y difusa, las extracciones significativas de agua y pérdidas en los sistemas de distribución, la incidencia de la regulación en el flujo del agua, incluidos trasvases y desvíos, la identificación de las alteraciones morfológicas en los cauces fluviales de cualquier grado de jerarquización y otros tipos de incidencia antropogénica significativa en el estado de las aguas superficiales, generalmente provocados por los distintos usos del suelo.

El sistema de indicadores y de rangos-pesos propuesto es inédito:

- **Sobreexplotación de acuíferos por el regadío**

Este indicador resulta de la relación entre las extracciones y la recarga neta, de acuerdo con la definición de sobreexplotación que consta en el RDPH, RD 849/86 de 11 de abril y 606/2003 de 23 de mayo.

De acuerdo con los valores de recarga neta calculados para el año hidrológico 2002/03, de carácter especialmente húmedo, la recarga en la zona planimetrada del acuífero ($42,1 \text{ km}^2$) ascendió a $1,82 \text{ hm}^3/\text{año}$ (calculado por el balance hídrico en el suelo). Los recursos renovables ascienden a $0,99 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el mismo período, lo que indica que el acuífero no se encuentra sobreexplotado.

En caso de concurrir situaciones de sequía el indicador cobrará especial importancia, sobre todo si la sequía presenta un carácter plurianual, en cuyo caso sería preciso introducir un factor de ponderación. Se ha optado por un factor igual al doble del número de años de concurrencia de situación de sequía desde el inicio del ciclo, ya que no se trata de un efecto acumulativo, sino exponencial

El indicador ha sido estudiado para la totalidad del acuífero, no para alguna unidad hidroambiental (UHA) determinada.

El sistema *rangos-pesos* propuestos es el siguiente:

RANGOS	PESOS	Factor ponderación
Recarga >>> extracciones	0	x 1 si es el primer año de sequía
Recarga = extracciones - 10 %	50	x 2 si es el segundo año
Recarga = extracciones - 10 a 25 %	75	x 4 si es el tercer año seco consecutivo
Recarga = extracciones - >25 %	100	x 8 Así sucesivamente

Se han establecido cuatro rangos: la recarga supera las extracciones, la recarga es inferior a la cifra de extracciones en menos de un 10 %, la diferencia es inferior al intervalo de 10 a 25 % y, por último, la recarga es menor que las extracciones con una diferencia mayor del 25 %.

Para el primer ciclo de recarga se considera un producto de 25. El n.º de medidas/tiempo tendría cadencia anual realizándose al término del año hidrológico.

• Balance de nutrientes en las aguas de recarga

El destino inmediato de las aguas de recarga es el regadío. Aunque el agua del río Voltoya presente características idóneas, la influencia de ciertos aspectos modificadores puede inducir un cambio cualitativo importante a lo largo del período de circulación de las aguas de recarga por el caz.

El indicador de calidad de las aguas para zonas con riego de aguas procedentes de embalses o estructuras artificiales de recarga adoptado ha sido la concentración de nutrientes en el agua, bien sea por el sumatorio de los componentes principales (fósforo, nitrógeno y clorofila), o bien por la abundancia de carbono orgánico disuelto o total (COD - TOC) en las aguas.

Este indicador es previsible que aumente a lo largo de los distintos ciclos de recarga, dado que la colmatación ejerce una influencia importante en la abundancia de TOC.

El indicador se presta además para el control de las estructuras de limpieza y filtrado y la **efectividad del pretratamiento** de las aguas de recarga.

El parámetro puede ser controlado en el caz de recarga artificial y en los sondeos de riego. En principio, como indicador de presión se considera más procedente su estudio a lo largo del caz de recarga, puesto que en los sondeos de riego sería más tipificable dentro del grupo de indicadores medioambientales de respuesta.

El cálculo del indicador se pretende realizar mediante mediciones en estaciones distantes 2 km a lo largo del caz, por lo que es previsible contar con seis puntos de control. De acuerdo con la concentración de COT en cada punto, la longitud de caz contaminada será calculada mediante la siguiente fórmula:

<p style="text-align: center;">Longitud del caz contaminada (%) = = (n.º puntos con más de 6 mg C/l / n.º de puntos controlados) x longitud</p>
--

El estándar de calidad es de **6 mg C/l**, de acuerdo con las conclusiones derivadas del apartado de hidroquímica.

La longitud asciende a 11.667 m en el primer ciclo de recarga. En marzo de 2004 comenzaron labores de ampliación.

Se propone el siguiente sistema rangos-pesos:

RANGOS (mgC/l)	PESOS
0-5	25
5-7	50
7-8	75
> 8	100

con una determinación mensual durante el semestre de recarga en los seis puntos de control.

- **Modernización y mejora de los dispositivos**

Se trata de un indicador de la eficiencia de los dispositivos de AR, no tanto con respecto a sus resultados. Los parámetros a controlar quedan supeditados a la idoneidad técnica y constructiva del proyecto, independiente del grado de colmatación que alcance (que quedaría dentro de los indicadores de respuesta).

Los parámetros a controlar son los siguientes:

- Idoneidad del diseño.
- Efectividad del trazado.
- Grado de ajuste de los dispositivos empleados a los ideales para este tipo de acuíferos.
- Capacidad de pretratamiento del agua de recarga.
- Efectividad de los filtros.
- Efectividad de los dispositivos de decantación.
- Efectividad de los dispositivos de protección frente a agentes externos (avenidas, barro, etc.).
- Efectividad de los dispositivos de desoxigenación.
- Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.
- Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.

Si se evaluara del 1 al 100 cada uno de los dispositivos, el peso o “*nota final*” correspondería al indicador de partida para el primer ciclo de recarga. Son tantos los parámetros que concurren que se propone un sistema que estudie las variaciones del indicador tras ser asignado un valor inicial. Su determinación debe realizarse de forma conjunta a la memoria de recarga artificial anual, al finalizar el ciclo de recarga (la concesión expira el primero de mayo de cada año). Además es previsible que el listado sea incrementado tras nuevos ciclos de recarga, por tanto, el indicador inicial perdería

validez. De este modo se sugiere considerar una media aritmética de las diferentes evaluaciones.

Para el primer ciclo de recarga, tras analizar la efectividad de los dispositivos, la atribución subjetiva del autor de acuerdo con estos criterios sería la siguiente (Tabla 4.10):

PARÁMETRO	PESO 1ER CICLO	PESO 2º CICLO
Idoneidad del diseño.	70	
Efectividad del trazado.	50	
Grado de ajuste de los dispositivos empleados a los ideales para este tipo de acuíferos.	60	
Capacidad de pretratamiento del agua de recarga.	0	
Efectividad de los filtros.	0	
Efectividad de los dispositivos de decantación.	0	
Efectividad de los dispositivos de protección frente a agentes externos (avenidas, barro, etc.).	80	
Efectividad de los dispositivos de desoxigenación.	0	
Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.	0	
Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.	40	
Evaluación final media	30	

Tabla 4.10. Diseño de la tabla empleada para el cálculo del sistema de indicadores medioambientales de presión: modernización y mejora de dispositivos.

Todos los parámetros que cuentan con un peso de cero quiere decir que el diseño inicial del dispositivo carece de estos elementos, si bien la mejora posterior quedará reflejada en el indicador a medida que se construyan.

Al finalizar el segundo ciclo (1 de mayo de 2004) y en caso de hacerse una memoria del mismo se podría aplicar el mismo criterio de cálculo del indicador. Una diferencia positiva representa mejoras en los dispositivos, mientras que si es negativa conlleva un impacto ambiental severo inherente al diseño de la estructura.

Cualquier modificación, ampliación o mejora debe quedar reflejada en este indicador, si bien la disponibilidad presupuestaria condiciona los distintos parámetros de forma directa.

• Eficacia del uso del agua

Indicador de la eficiencia de los dispositivos de AR en cuanto a su funcionamiento y efectividad. Los parámetros a controlar son básicamente tres:

- Tasa de infiltración media calculada tras el ciclo de recarga (método WTF VA).
- Indicador del porcentaje de pérdidas en las conducciones (Carrera, 1997). Valoración en base a la eficiencia de la red.
- Indicador del porcentaje de pérdidas por evaporación. Calculada en base a la superficie de infiltración de los dispositivos que se encuentra al aire libre y en

función del carácter del año hidrológico. Su cálculo se realiza mediante fórmulas evapotranspirativas convencionales.

Se trata de un indicador parecido al anterior en cuanto a funcionamiento, si bien se diferencia de éste por presentar más independencia respecto al diseño inicial.

El valor del indicador resulta del cálculo del mismo y comparación con el valor inicial tras el primer ciclo de recarga, período en el que las instalaciones se encontraban escasamente colmatadas, la eficiencia de la red era alta y el año hidrológico muy húmedo.

El valor inicial asignado es de 100. Al contrario que en el caso anterior, cualquier variación posterior debe ser menor, ya que difícilmente puede ser sobrepasado el indicador, salvo que se lleven a cabo modificaciones sustanciales por efecto de la colmatación, deterioro de las conducciones y concurrencia de años hidrológicos más secos.

El cálculo para el primer ciclo de recarga es el siguiente:

PARÁMETRO	PESO 1ER CICLO	PESO 2º CICLO
Efectividad de los dispositivos de desoxigenación.	100	
Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.	100	
Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.	100	
Evaluación final media	100	

Su evaluación se debe llevar a cabo al final de cada ciclo (como en el caso anterior), obteniendo un escalor que valore en qué grado de eficiencia están siendo utilizadas las aguas de recarga.

Como criterios técnicos medioambientales ajenos a la hidrogeología existen dos indicadores, cuyo resultado condicionará de manera determinante las actuaciones en el sistema, que son:

- **Evaluación socioeconómica**

Este indicador debe evaluar la viabilidad de las actuaciones y su prolongación en el tiempo en base a criterios presupuestarios, demanda social canalizada a través de los mecanismos legales.

El funcionamiento del humedal se basa, en gran medida, en la “bondad” de los resultados agrícolas, productividad de las cosechas, evolución de los índices económicos de la comarca, etc.

El índice está supeditado a la calidad de vida de la población, lo que requiere el empleo de índices económicos cuantitativos.

El indicador adoptado debería ser relativo para detectar cambios. Un posible indicador será los ingresos declarados por parte de los agricultores, si bien adolece de precisión.

Para el primer ciclo de recarga se considera un peso = 0.

- **Procedencia política de la actividad**

En vista de las circunstancias políticas actuales, con cambios de gobierno, derogación de un proclamado *Plan Hidrológico Nacional*, basado principalmente en la utilización de aguas superficiales, las operaciones de recarga artificial (AR) quedan supeditadas a la procedencia política, necesidades de innovación, presiones de grupos ecologistas y técnicos sensibilizados con la importancia de las actuaciones.

Un posible indicador se basaría en el número de actividades propuestas que son llevadas a cabo en el tiempo.

Para el primer ciclo de recarga se considera un peso = 0.

- **Indicadores para la recuperación de humedales**

Dentro de los indicadores de presión se presenta un grupo específico para la **recuperación de humedales mediante operaciones de recarga artificial**. En muchos casos debe adoptarse un sistema de indicadores para cada humedal a restaurar, dado que es inviable acometer la regeneración hídrica simultánea a todos los humedales del *Complejo*.

En vista de que estas operaciones no han comenzado en la actualidad, se definen los indicadores diseñados, pero resulta inviable otorgar un valor a los rangos o pesos, ya que se trata de situaciones hipotéticas.

Se han diseñado cinco indicadores:

A). Cercanía al dispositivo de recarga (medido en tiempo de tránsito)

Indicador de la distancia entre el dispositivo de recarga (bien sea caz de recarga o pozo de infiltración para recarga inducida).

Este indicador puede ser modificado por alteraciones de la permeabilidad del material de la franja que queda comprendida entre ambos (caz y humedal), a medida que prosperan los procesos colmatantes. Por tanto, no debe ser entendido como distancia física, salvo en casos de vertido directo, sino como tiempo que tardan las aguas de recarga en alcanzar el objetivo tras experimentar en su circuito subterráneo o semisubterráneo las modificaciones cualitativas correspondientes.

El indicador sería el equivalente al “Tiempo que tarda en alcanzar el agua del caz o dispositivo los pozos o humedales objetivo, en función de la permeabilidad, gradiente, etc”. Este indicador debe estar referido a una fecha determinada. Cualquier aumento conlleva el deterioro de las condiciones de recarga, indicando la necesidad de tomar medidas al respecto.



Su determinación es compleja. En principio, lo más recomendable parece ser el empleo de trazadores, o bien el seguimiento del avance del bulbo de humidificación, controlando el paso de funcionamiento en “control vertical” a “control lateral.”

Una proposición inicial, pendiente de ajustar con datos empíricos, sería establecer cuatro rangos en función del número de días precisos para la llegada al humedal de las aguas desde el dispositivo de recarga inducida:

RANGOS	PESOS
0-5:	25
5-10:	50
10-20:	75
>20:	100

La determinación sería mensual durante el funcionamiento del dispositivo (6 medidas/ciclo).

B). Radio de influencia⁹

Este indicador quedará definido por la distancia medida en la horizontal entre un humedal o pozo de extracción y el caz o dispositivo de recarga, en el caso de que el nivel del agua del dispositivo influente queda por encima del nivel freático estabilizado del ganador (zona de control lateral).

Se trata de la distancia física más que del tiempo de tránsito, siendo, por tanto, un parámetro de gestión que variará a medida que prospere el llenado del cuenco del humedal objetivo. Sirve además para la toma de decisiones relativas al caudal de bombeo en pozos incorporados al circuito de recarga inducida.

Una proposición inicial, pendiente de ajustar con datos empíricos, sería:

RANGOS	PESOS
0-100:	25
101-200:	50
201-500:	75
> 500:	100

La determinación sería mensual durante el funcionamiento del dispositivo (6 medidas/ciclo).

C). Presencia de ecosistemas hidrodependientes y termodependientes

⁹ El radio de influencia es la distancia existente entre un pozo de bombeo y la zona del acuífero en la que la influencia puede considerarse nula. Según la fórmula de Thiem para acuíferos confinados y régimen permanente, que en este tipo de régimen el acuífero funciona como un mero transmisor de agua desde la zona de recarga a la de descarga; por tanto, el volumen de agua almacenada no varía. Este radio es dependiente del caudal de bombeo, de la transmisividad del acuífero y del radio del pozo de bombeo. Por la fórmula de Jacob para régimen variable (hay variación en el volumen de agua almacenada en el acuífero), es dependiente de la transmisividad del acuífero, del tiempo de bombeo y del coeficiente de almacenamiento.

Indicador de carácter ecológico basado en la presencia/ausencia de especies poco tolerantes a los cambios de calidad del agua y temperatura en un ecotono, así como la presencia/ausencia de elementos sensibles a la depresión de niveles freáticos (freatofitas) y su relación entre la profundidad radicular y la posición del nivel freático.

El indicador es de presencia/ausencia. Para su aplicación es preciso contar con inventarios de fauna y vegetación de los humedales objetivo.

Su determinación debe ser llevada a cabo antes del inicio de las operaciones de AR.

D). Relación de los humedales con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas, etc.

Se trata de un indicador cuantitativo para aplicar durante la etapa de caracterización del “entorno preoperacional”. Se basa en determinar el “grado de vinculación” entre distintos elementos del sistema (conexión hídrica por aguas superficiales y/o subterráneas a partir de un *nivel de llenado* determinado, etc.). El indicador funcionaría, por tanto, comprobando sus variaciones a lo largo del tiempo.

Un caso detectado durante el primer ciclo ha sido la conexión hidráulica entre ciertos manantiales de la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma, que han cobrado actividad tras el inicio de las operaciones de AR.

Esta vinculación puede sufrir determinadas alteraciones por efecto de la recarga artificial, con su consecuente influencia en la hidrología del sistema. El sistema de rangos pesos adoptado, basado en variaciones relativas entre mediciones sucesivas, es:

RANGOS	PESOS
0-5%:	25
5-10%:	50
10-20%:	75
>20%:	100

Número de medidas/tiempo: anual al término del ciclo de recarga (mayo).

6.2.3.1. Cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de presión

Una vez conocidos los resultados de los distintos indicadores se puede hacer un cálculo parcial para el período de recarga considerado. Todos aquellos con más de un cálculo a lo largo del año (por ser medidos en distintas ocasiones) son promediados, de modo que el valor final será la media aritmética de las sucesivas mediciones.

La tabla de síntesis y su aplicación para los dos humedales seleccionados (Laguna de las Eras y Laguna de la Iglesia) se presenta en el anexo 4.5.1.

6.2.4. Indicadores medioambientales de respuesta

En esta etapa del estudio resulta inviable proporcionar un sistema de indicadores medioambientales sólido, ya que la gran mayoría derivarán del estudio de las condiciones de referencia y de la tendencia evolutiva en un plazo más largo de un ciclo de recarga. No obstante, existe un *común denominador* para todos ellos: deben reflejar la evolución cuantitativa, cualitativa y ecológica de las aguas presentes en la Cubeta de Santiuste, sea cual sea su procedencia.

El tratamiento de los datos cuantitativos y cualitativos permitirá el diseño o adopción de éstos, aplicando procedimientos estadísticos de aceptación científica internacional.

En este apartado se presenta un sistema de indicadores diseñado en base a criterios básicos de ingeniería ambiental gracias a los datos disponibles hasta la fecha y a experiencias en sistemas análogos que, en principio, parecen apropiados para el fin pretendido, si bien no pueden considerarse definitivos en esta etapa del estudio. En principio se consideran 15 indicadores, listados en el anexo 4.5.3 y descritos a continuación:

- **Evolución de las dimensiones del caz de recarga**

Algunos parámetros constructivos se han visto afectados durante las labores de AR, como, por ejemplo, la superficie de infiltración a medida que aumenta o disminuye la altura de la lámina de agua, que hmedece y seca los taludes del dispositivo propiciando desprendimientos, la profundidad del caz, que varía por efecto de la formación de depósitos colmatantes en el fondo, pendientes del talud por erosión directa, etc.).

La velocidad del agua también ha sido un factor determinante en la estabilidad de los taludes del caz, especialmente en zonas con presencia de fuertes curvaturas, tendiendo a erosionar la zona donde impactan las aguas con mayor velocidad, en general la zona cóncava.

Otros factores externos han influido en la estabilidad de los taludes, como el tránsito de tractores por la vía de servicio, precipitaciones, fenómenos de hinchamiento por congelación, etc.

Este indicador puede ser representativo de la cantidad de horas de maquinaria que deben ser empleadas para las labores de mantenimiento, siendo, por tanto, un parámetro de gestión y de ayuda a la toma de decisiones.

El diseño del indicador podría estar basado en el número de puntos con incidencias detectadas en una inspección visual, lo que permite su medida a la vez que se toman otros datos, como puede ser la medida de la red de control de la recarga (RCR) a lo largo del caz. Algunos ejemplos pueden ser consultados en las figuras 5.06 a) y b) del bloque 5.

- **Aterramiento de canales, presas, cauces artificiales y/o naturales, etc.**

Se trata de un indicador similar al anterior en cuanto a funcionamiento y finalidades. Su determinación resulta relativamente fácil mediante la medición directa del espesor de arenas sobre el fondo de las estructuras, especialmente junto a las paradas y dispositivos de disipación de energía y de remanso de las aguas.

En el primer ciclo de recarga no se han llevado a cabo medidas de este tipo, si bien en marzo de 2004 se ha comenzado a realizar determinaciones de este parámetro en campo.

- **Aumento de la erosión y acarcavamiento de los taludes y área de influencia**

La desnudez de vegetación que tienen las estructuras y dispositivos conlleva ciertos incrementos del efecto de la erosión eólica, erosión por impacto de la gota de lluvia, etc. En general, la erosión actúa en los taludes, y los sedimentos van a parar al fondo del caz de recarga. De este modo se aprecia una mezcla de *cake* y arena en el fondo del caz durante los períodos estivales sin recarga.

Las pendientes de los taludes también se ven modificadas por efecto de la erosión, tendiendo a un perfil convexo-cóncavo desde arriba hacia abajo.

La cota de los dispositivos también puede variar por efecto de la erosión.

La cuantificación de este impacto puede ser llevada a cabo mediante indicadores convencionales, como es la aplicación de la ecuación de emisión media anual de sedimentos o *Coeficiente de emisión de Williams* para cuantificar el movimiento de tierras (*Williams, 1975; Williams & Berndt, 1977.*). Esta ecuación ha sido aplicada con buenos resultados para el cálculo de la colmatación del cuenco lagunar en determinados humedales (*CMA JA, 2001*).

- Emisión media anual de sedimentos. Coeficiente de emisión de Williams

El coeficiente, aplicado a la erosión que se produce en una cuenca, da la parte de esa erosión que se emite como media anual por la desembocadura. Su expresión es la siguiente:

$$CE = 1,366 \cdot 10^{-11} A^{-0,0998} R^{0,3629} CN^{5,444}$$

Donde:

- A, el área de la cuenca en km².
- R, relación desnivel/longitud hidráulica, en km.
- CN, número de curva.

Esta ecuación dimensiona las variaciones en colmatación, tanto del cuenco lagunar como de las orlas perimetrales e incluso de la subcuenca hidrográfica.

Por ser CE la parte de la erosión total anual (t/año) que se produce en una cuenca o unidad hidrológica que es emitida por la desembocadura del cauce que recoge la

escorrentía de esa unidad hidrológica. Su valor no puede ser superior a 1. Aunque matemáticamente CE si puede tener un valor superior a 1, en este caso se atribuirá el valor superior admisible (1) para realizar el cálculo de la emisión media anual (t/año).

Los valores de la erosión total anual en cada cuenca o UH pueden ser calculadas mediante el método USLE/MUSLE.

La USLE modificada (MUSLE) puede aplicarse a una cuenca si las fuentes de sedimentos están uniformemente distribuidas por la misma y si las subcuencas tributarias más importantes son hidráulicamente semejantes. Al aplicar el modelo a las unidades hidrológicas (UH) previamente definidas ambas premisas se cumplen. La expresión analítica de la MUSLE, establecida por Williams, es la siguiente:

$$Y = 11,8 (V Q_p)^{0,56} K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Donde:

- Y, es el arrastre producido por una tormenta aislada determinada, en toneladas.
- V, es el volumen de la escorrentía directa, en m³.
- Q_p, es el caudal instantáneo máximo, en m³ s⁻¹.
- K, es el factor de erosionabilidad del suelo.
- LS, es el factor topográfico (factores de longitud de declive y pendiente).
- C, es el factor de cultivo.
- P, factor de prácticas de conservación de suelos.

Un valor apropiado de densidad media es 1,5 t/m³ para los materiales aportados a las lagunas, planimetradas las superficies de cada laguna en hectáreas.

El efecto de la emisión anual de sedimentos para cada laguna, en términos de espesor aportado uniformemente al lecho de las mismas, es que el nivel del fondo de dichas lagunas se va elevando por efecto del aterramiento. La estimación realizada considera un reparto uniforme por todo el vaso de la laguna, situación que en la realidad no se produce, pero que constituye una buena aproximación a la realidad (CMA JA, 2001).

En el caso real se producirá una acumulación de sedimentos a una distancia determinada de la desembocadura del cauce en las lagunas, en función de la intensidad de la emisión, que dará lugar a un lecho irregular con la posible aparición de barras o espigones. Estas formaciones estarán variando su forma cada año, según la avenida y su intensidad anual.

Hay que considerar que la densidad de los sedimentos depositados en el lecho de las lagunas aumenta año a año por efecto de compactación debido a las nuevas capas aportadas cada año, lo que supone, a su vez, una disminución del espesor de los sedimentos más antiguos y el aumento de la profundidad de las lagunas.

Cada cuenco lagunar debe ser atribuido a su microcuenca endorreica.

La evolución de la tasa de colmatación de las lagunas en las que se apliquen medidas regenerativas basadas en la recarga artificial constituye una interesante línea de investigación, que no puede ser abarcada en el desarrollo de esta tesis doctoral dado su

carácter preliminar ante este tipo de actuaciones, si bien queda definido un posible indicador, su funcionamiento y aplicación, relativamente fácil tras preparar una hoja de cálculo con la parametrización de los datos de campo y teóricos.

- **Diferencias de cota del nivel del agua y pendientes**

El indicador está enfocado al estudio de la peligrosidad o impacto por efecto de las operaciones de recarga en terrenos cultivados o estructuras de obra.

Se calcula sustrayendo a la cota del terreno la del agua subterránea en un determinado sector, estudiando el paralelismo con la superficie topográfica, con objeto de determinar zonas más vulnerables ante posibles inundaciones.

La detección de domos en la capa freática por efecto de la heterogeneidad del acuífero resulta otro factor clave en las inundaciones, a pesar de tratarse de zonas escasamente deprimidas con respecto al entorno.

Las zonas vulnerables pueden ser calculadas en gabinete mediante operaciones de álgebra de mapas, quedando limitado el uso del indicador a estudiar en campo las variaciones de la capa freática y su cercanía a la profundidad de alerta establecida en 2 metros (*Christen et al, 2001*).

- **Alteraciones en los parámetros hidrogeológicos**

Existe una relación directa entre la variación de las propiedades hidrogeológicas del acuífero y la recarga, por colmatación de los poros del acuífero con los sólidos disueltos en las aguas de recarga, especialmente de la permeabilidad (K), el coeficiente de almacenamiento (S) y la transmisividad (T).

El sistema rangos-pesos será dependiente de la variación de magnitud del parámetro. Este indicador está condicionado de forma directa por la colmatación.

- **Colmatación del dispositivo y descenso de la permeabilidad del lecho**

Este indicador valora el impacto de mayor intensidad que actúa en las instalaciones de AR: la colmatación.

La evaluación del impacto requiere del empleo de procedimientos indirectos, ya que no es fácilmente cuantificable. Con este objetivo se han llevado a cabo dos tipos de actuaciones diferentes, basadas en ensayos de infiltración y en el estudio con lupa binocular en el cake muestreado en el fondo de caz a distintas profundidades al final del primer ciclo de recarga.

1). Ensayos de infiltración. Se han llevado a cabo durante el segundo ciclo de recarga. Para ello fueron seleccionadas zonas donde habían sido realizados ensayos previos, con objeto de detectar variaciones en la tasa de recarga, en caso de haberlas.

Los ensayos realizados por el MAPA en 1999, 2003 y 2004 en las inmediaciones de Villagonzalo de Coca desprenden valores bastante similares en cuanto a la tasa de infiltración se refiere, si bien los ensayos no fueron llevados a cabo en el mismo punto, los dispositivos fueron diferentes (fosos, canales y balsas), realizados en distintas épocas del año, con la consecuente variación de la humedad del suelo, etc. Ante tal variabilidad de parámetros incontrolados, a fecha de hoy no hay datos relevantes para evaluar diferencias puntuales en la tasa de recarga.

Una vez terminado el segundo ciclo de recarga y estudiada la tasa de infiltración media para la totalidad del período, previsiblemente se podrá contar con un criterio adicional para evaluar el efecto de la colmatación en la tasa de infiltración, si bien el método es mejorable, ya que concurren muchos parámetros interrelacionados, como la entrada de aire al sistema, ciclos de heladas, etc.

2). Estudio comparativo con lupa binocular y microscopio de los sedimentos del fondo del caz antes y después del primer ciclo de recarga artificial. De este modo se ha estudiado las variaciones cualitativas, la del porcentaje de finos, etc., en el dispositivo principal.

Se ha realizado un muestreo y estudio mediante lupa binocular de muestras tomadas al término del primer ciclo de recarga en las inmediaciones del "Cuerno de la Revilla" y en la zona del Sanchón. Se han tomado dos muestras en cada localización, en superficie (*cake*), y entre 15 y 20 cm de profundidad. La fecha de muestreo fue el 14 de junio de 2003.

En las siguientes figuras se ilustra el aspecto de las muestras superficiales tomadas en situación inalterada (antes del primer ciclo) y en junio de 2003, en superficie y a 15 cm de profundidad (Figs. 4.39 a 4.41).

El estudio del *cake* con lupa binocular tras el primer año de recarga arroja las siguientes observaciones y conclusiones:

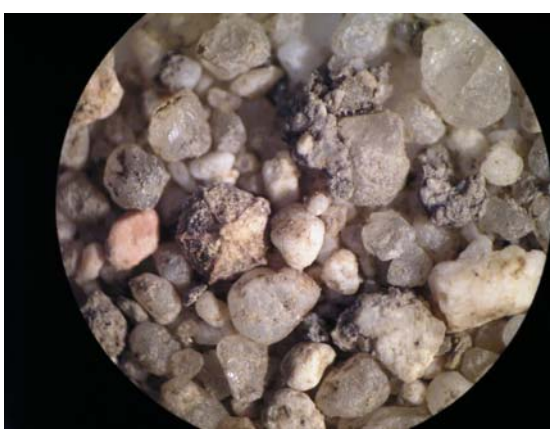
A nivel superficial se aprecia un incremento importante en finos, geles y, en general, partículas disueltas de origen orgánico, que una vez desecadas presentan un aspecto deshidratado y escaso volumen, que aumenta considerablemente al humedecer las muestras. Se aprecian además semillas y granos de polen (*vid. 4.41 a y b*), que se consideran indicios de la alta actividad orgánica de los sedimentos del fondo del caz de recarga, con indicios de colmatación por procesos de *bioclogging*.

La textura arenosa inicial se ve fuertemente alterada, abundando las partículas finas adheridas a la superficie de los granos de arena por adhesividad, propiedad inherente a la alta carga superficial de las arcillas.

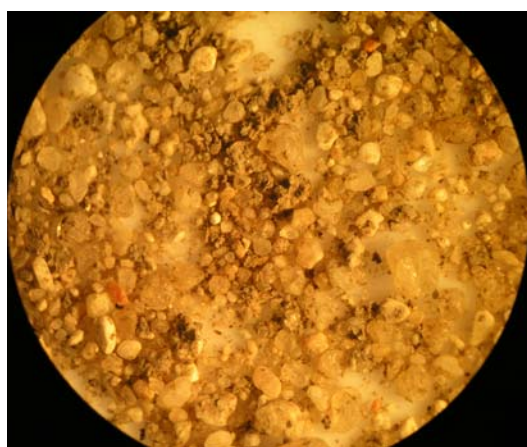
La presencia de partículas ennegrecidas por óxido induce a pensar en la influencia de la concentración de oxígeno disuelto en el sistema, apreciándose además filamentos metálicos oxidados. En los perfiles hidroquímicos se ha detectado que la disolución de hierro en condiciones reductoras viene seguida por procesos oxidantes y precipitación de hierro, catalizados por bacterias (*Stuyfzand, 1993*).



Figs. 4.39 a) y b). Aspecto del medio receptor previamente a las operaciones de AR. Muestreo superficial. Fotografías a distintas escalas.



Figs. 4.40 a) y b). Aspecto del medio receptor (caz de recarga) tras el primer año de actividad. Muestreo realizado en el cake superficial hasta 2-3 cm. Fotografías a distintas escalas.



Figs. 4.41. a) y b). Aspecto del medio receptor (caz de recarga) tras el primer año de actividad. Muestreo realizado a 15 cm de profundidad.

El *cake* superficial presenta un índice de sobresaturación en calcita en la matriz y cemento, según se desprende de su reacción con el ácido clorhídrico en sectores donde no ocurría tal reacción previamente a las operaciones de AR.

Dada la necesidad de implantar un sistema de control de la colmatación y dado que existe un grado de conocimiento del acuífero en fase preoperacional suficiente, resulta preciso elaborar o adoptar un índice de colmatación específico.

- Diseño de un indicador medioambiental específico

Como punto de partida, se ha realizado un estudio de los índices de colmatación ya diseñados disponibles en la literatura hidrogeológica, como son los indicadores: Índice de taponamiento, Índice de Fallo en Membrana (MFI), Carbono Orgánico Asimilable (AOC), Velocidad de Generación de Biofilm (BFR) y Test de Paso del Filtro (BFT). Estos indicadores han sido descritos en el marco teórico general presentado en el Bloque 1.

Una valoración inicial del índice MFI en la Cubeta para el primer ciclo de recarga es de **25 a 30 s/l²** unidades MFI, según se ha especificado en el Bloque 1.

Las condiciones específicas en que se desarrolla la actividad y el diseño del dispositivo de recarga han generado la necesidad de elaborar un indicador específico, dado que ninguno de los cuales se ajusta a las propiedades del medio, disponibilidad de datos y carestía de cálculo.

A tenor de los resultados obtenidos, se propone el indicador específico para la zona de estudio y escenarios análogos. Este indicador tiene en cuenta el potencial de colmatación físico, biológico e indirectamente químico para sistemas de recarga superficiales.

Los parámetros más importantes que deben ser determinados, en base a las observaciones realizadas durante el primer ciclo de recarga, son los siguientes:

- TOC agua de recarga.
- % de arcilla en el medio receptor.
- Superficie de infiltración.
- Tiempo de recarga.
- Volumen recargado.

Todos estos parámetros pueden ser agrupados en un sencillo indicador, que corresponde a variaciones en el **porcentaje de finos en el suelo** y su evolución a lo largo del año/ciclo de recarga. Este indicador refleja la cantidad de partículas finas de origen orgánico y la cantidad de finos que desde el agua de recarga pasan al acuífero. El porcentaje es dependiente de los parámetros de gestión, por tanto, debe tenerse en cuenta la superficie de infiltración, el tiempo y el volumen. Lógicamente con mayor tiempo y volumen de actuación el indicador previsiblemente será mayor.

El indicador puede ser evaluado mediante una simple granulometría, empleando para ello un filtro de finos tipo 200 ASTM. Las muestras deben ser tomadas en superficie y a 20 cm de profundidad una vez al mes en las distintas estaciones de control del dispositivo. En principio se considera suficiente un total de 6 estaciones equidistantes 2 km. El muestreo debe realizarse al menos una vez al mes durante el período de operatividad del dispositivo, y una vez más en la época estival antes del inicio de las labores de limpieza y mantenimiento.

El porcentaje de finos (en peso) con respecto al valor inicial indica las diferencias cuantitativas. La diferencia de pesada es sometido a un factor corrector. En principio, se propone que sea dividido por el número de días de recarga desde el inicio del ciclo hasta la fecha de muestreo, y multiplicado por 100 para que el rango alcance un valor más cercano al de los restantes indicadores, quedando por encima de éstos al tratarse de un indicador de los más importantes. El hecho de disponer de tantas mediciones a lo largo el ciclo conlleva la necesidad de emplear el valor medio de todos ellos como indicador global al término del ciclo de recarga.

El indicador tiene una valía especial para la previsión de las labores de mantenimiento, duración, cadencia y, en general, grado de actuación.

Dentro de las medidas preventivas y correctoras a aplicar para corregir el efecto nocivo de los procesos colmatantes hay un amplio grupo de actuaciones aplicables al suelo o medio receptor, a los dispositivos y al agua de recarga.

Con estas características de partida, cualquier actuación de este tipo puede ser considerada una técnica SAT. Estas técnicas son tratadas de manera específica a lo largo del Bloque 5, donde son analizadas las alternativas y medidas que pueden aplicarse para minimizar el efecto de la colmatación.

En definitiva, la colmatación puede ser considerada un indicador de respuesta ante las operaciones de recarga.

- **Concentración de oxígeno disuelto en los piezómetros de observación de la red de control de la recarga (RCR)**

El estudio de ambientes hidroquímicos requiere precisar la concentración de oxígeno disuelto en las aguas subterráneas y su evolución en el tiempo. La determinación de la concentración permite estudiar las fases donde se produce la máxima desaireación de las aguas de recarga, la generación de ambientes oxidantes o la gravedad del efecto *Lisse* en caso de manifestarse.

Se han probado dos isorrelaciones iónicas con resultados satisfactorios para las condiciones del acuífero superficial, que son las relaciones Fe/O_2 y NO_3/O_2 . Estas relaciones confrontan la persistencia del oxígeno disuelto en las aguas subterráneas con la presencia de hierro y nitratos en el acuífero, sustancias presentes y abundantes en las condiciones del estado preoperacional.

Ambas posibilitan deducir y posicionar ambientes hidroquímicos en el acuífero y averiguar qué zonas presentan predominio de reacciones oxidantes, reductoras, etc., que requieren aplicar técnicas SAT para minimizar la contaminación, evitar la génesis de precipitados, disminuir el grado de colmatación, etc. Estas relaciones son descritas con detalle en el Bloque 3.

- **Evolución de la calidad del agua subterránea por el uso de fertilizantes nitrogenados en el regadío**



Al igual que el anterior, permite determinar las variaciones en la hidroquímica de las aguas subterráneas. El indicador funciona al cuantificar las diferencias entre fechas consecutivas del indicador de estado de variaciones del contenido en nitratos de las aguas subterráneas (*acuíferos contaminados por nitratos*).

- **Concentración en carbonato en las aguas de recarga**

Al igual que los dos anteriores, el control de la concentración en carbonatos en las aguas de recarga y en el acuífero permite conocer la presencia de ambientes reductores en el sistema. Una vez localizados y tratados mediante técnicas SAT es preciso ver su evolución mediante el empleo de este indicador.

La variación de la alcalinidad en el acuífero entre fechas sucesivas debe contar con la determinación previa en las aguas de recarga.

- **Afección en cultivos dentro del área de influencia**

La pérdida de cosechas por inundaciones simultáneamente a las operaciones de recarga artificial pueden ser consideradas como un indicador económico de respuesta (*Beaufoy, 2000a y b*). El indicador queda en función de la cuantía de las pérdidas por efecto de las inundaciones.

- **Afección en la vegetación nativa dentro del área de influencia**

Los humedales sometidos a un grado de afección importante responderán ante el impacto ocasionado con sustituciones de la vegetación endémica típica por otras especies alóctonas o bien autóctonas menos impropias.

La afección a la vegetación nativa puede ser estudiada como un indicador de presencia/ausencia.

La presencia de especies exóticas, nitrófilas, etc., indican un grado de afección relevante.

La ausencia de las siguientes especies, típicas de la zona, puede constituir la otra faceta del indicador.

- *Aerulopus littoralis*.
- *Artemisia caerulescens*.
- *Convolvulus lineatus*.
- *Frankenia lavéis*.
- *Juncus maritimus*.
- *Juncus subulanus*.
- *Limonium costae*.
- *Suaeda vera*.

Este listado no es exhaustivo, y es preciso ampliar el conocimiento de las condiciones ecológicas de los humedales para su diseño.

- **Variaciones en las condiciones ecológicas en los humedales**

Como indicador de respuesta ante la posible recuperación de humedales mediante las operaciones de recarga artificial, cabe diseñar un nuevo tipo de indicador ecológico basado en el estudio de las condiciones ecológicas en los humedales. Este indicador servirá para comprobar la idoneidad de la recarga sobre los humedales que se pretende recuperar a partir de determinaciones de presencia/ausencia de determinadas especies de flora y fauna en los humedales en determinadas estaciones del año.

Algunas de las especies indicadoras de flora del cuenco y primera franja perilagunar, seleccionadas por su endemismo, por ser autóctonas y no tener carácter nitrófilo, son las siguientes (inventario propio con asesoramiento de dos biólogas botánicas):

- *Alopecurus geniculatus*.
- *Deschampsia cespitosa subsp. refracta*.
- *Rumex conglomerata* (ampliamente extendido por la zona).
- *Festuca arundinacea subsp. fenas*.
- *Juncus acutus*.
- *Juncus gerarsi*.
- *Scirpus maritimus subsp. cpmcompactus*.

En cuanto a especies de fauna, las más destacables es la presencia de anátidas tipo cerceta común (*Anas crecca*) y ánade rabudo (*Anas acuta*), al ser consideradas indicadores de aguas limpias, por ser una especie muy sensible a los cambios de calidad de las aguas.

El indicador requiere el seguimiento plurianual del sistema y la elaboración de sucesivos inventarios antes de contar con un diseño depurado.

- **Variaciones en el nivel del agua del cuenco en los humedales o del nivel freático en criptohumedales**

El indicador está referido para cuantificar las variaciones del nivel del agua en los bodones o lavajos con respecto a la cota definida en la definición morfométrica inicial. En todo caso tiene que estar referido a una fecha determinada.

La medición requiere del empleo de regletas graduadas fijas.

- **Reducción del consumo indebido de agua**

Se trata de un indicador que evalúa la eficiencia del riego y la variación de la efectividad de las conducciones entre fechas sucesivas. Se mide por el porcentaje de pérdidas en una posición aleatoria de manera periódica.



- **Balance de nutrientes en el regadío**

Se trata de un indicador de respuesta que permitirá conocer si las dosis de abonado son correctas o se está llevando a cabo un sobreabonado en los cultivos, con la consecuente degradación del sistema, introducción de especies nitrófilas, generación de condiciones hidroquímicas anómalas, etc.

El indicador funciona al cuantificar las diferencias entre fechas consecutivas, determinando la presencia de sobrecargas.

6.2.4.1. *Posibilidades de cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de respuesta*

Algunos de los indicadores de respuesta inicialmente diseñados pueden ser evaluados, mientras que otros precisan más ciclos de recarga para su correcta determinación, como pueden ser aquellos dependientes del período de residencia de agua en el acuífero. En todos casos son indicadores que operan tras actuar el hombre en el medio. Estos han sido sintetizados en la tabla que figura en el anexo 4.5.3.

El cálculo y aplicación para los humedales seleccionados se llevará a cabo tras iniciarse las labores de restauración medioambiental de los humedales mediante la técnica de recarga artificial de acuíferos. Estos indicadores son agregados al anexo 4.5.3, si bien su empleo queda postergado para un futuro.

6.3. EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS IDENTIFICADOS

La evaluación de impactos constituye un mecanismo metodológico que se encuentra regulado para el estado español por la Ley 6/2001 de EIA en su artículo 2 (véase apartado 3, donde se transcribe tal disposición legal).

El sistema de evaluación adoptado se basa en el diseño de dos variogramas dinámicos. El primero es una representación gráfica de la evaluación de los impactos recogidos en la ficha de caracterización, y sirve de apoyo para la construcción del siguiente. El segundo variograma se genera aplicando un sistema de rangos-pesos a los indicadores diseñados, junto con factores de corrección dependientes de la magnitud e intensidad del impacto.

6.3.1. Diseño de polígonos de evaluación multicriterio específicos

Dentro de los objetivos inicialmente previsto se encuentra el diseño de un variograma dinámico que refleje los distintos aspectos considerados. Se trata de un variograma parametrizado gráfico que refleje de forma intuitiva, visual, rápida y pedagógica la evolución de los aspectos cuantitativos, cualitativos y medioambientales durante y después de la recarga, así como su incidencia en los factores directamente relacionados. Algunos de los criterios considerados aparecen en estudios previos, como aquellos de carácter hidrogeológico (*Bascones, 2000*), incluyendo los hidroquímicos (*Custodio, 2001*), socioeconómicos (*Barbier et al, 1997*) y ecológicos (*Fdez. Escalante y Cordero, 2002*), mientras que otros son nuevos y diseñados *ex profeso* para el desarrollo de esta actividad.

Dada la pluralidad de aspectos considerados, el variograma debe ser considerado un "polígono de evaluación multicriterio."

El polígono se apoya en la caracterización del humedal y la evaluación de los distintos impactos recogidos en la ficha de la tabla 4.12, apartado 6.2.1.

Este variograma constituye un método de evaluación que parte de la caracterización del humedal, basado en indicadores de fácil evaluación. Los cinco grados de afección preestablecidos son los recogidos en la Ley 6/2001: Bajo (1), moderado (2), medio (3), severo (4) y alto (5).

Los campos sombreados pueden ser rodeados por una polilínea, que posibilita su uso como indicador medioambiental, ya que los distintos variogramas creados en distintas fechas pueden ser sobrepuestos, permitiendo ver las diferencias cualitativas y su evolución temporal (Fig. 4.42).

La evaluación sobre la caracterización constituye un punto de partida adecuado para elaborar un sistema de evaluación matricial, que relacione los factores del medio con los elementos. Para ello se ha diseñado un polígono de evaluación multicriterio basado en la aplicación de un sistema de rangos-pesos a cada indicador de estado o de presión.

INDICADOR DE ESTADO	BAJO	MODERADO	MEDIO	SEVERO	ALTO
Hidrodependencia del lago/humedal con acuíferos.					
Drenaje del lago/humedal.					
Presencia de cultivos alrededor.					
Vertido de residuos líquidos urbanos.					
Vertido de residuos líquidos industriales.					
Vertido de residuos sólidos.					
Alteración de la vegetación hidrófila.					
Introducción de nuevas especies.					
Construcción de embalses sobre un humedal previo.					
Aprovechamiento hidroeléctrico de los caudales.					
Urbanización dentro del perímetro de protección.					
Carga ganadera.					
Uso como abrevadero.					
Desarrollo de acuicultura intensiva.					
Excavado y movimiento de tierras.					
Vinculación con acuíferos sobreexplotados.					
Presión recreativa.					
Dragado.					
Represado.					
Rellenado.					
Extracciones de agua.					
Afección por pesticidas.					
Extracciones de áridos.					
Regulación hídrica.					
Previsión de trasvases.					
Regulación de actividades: caza, pesca, fines recreativos, medicinales, etc.					
Estatus.					

Fig. 4.42. Evaluación de impactos ambientales sobre la ficha de caracterización diseñada. El variograma permite llevar a cabo el seguimiento del humedal o elemento clave atendiendo a 5 grados de afección: bajo (1), moderado (2), medio (3), severo (4) y alto (5). Aplicación para la Laguna de la Iglesia, 2004. La elaboración de fichas consecutivas y superposición de transparencias permite detectar variaciones cualitativas en el humedal a lo largo del tiempo.

Esta proposición es específica para la Cubeta de Santiuste y otras zonas en las que se llevan a cabo labores de recarga artificial que presenten humedales relacionados. En ellas es preciso que una fracción de las aguas vaya destinada a "objetivos medioambientales", entendidos como objetivos de restauración de *elementos clave* dañados.

Este sistema de evaluación consta de dos etapas consecutivas:

- Numérica. Se basa en el cálculo de un valor para cada indicador tras aplicar el sistema de rangos-pesos descrito en su definición, y, si procede, el factor de corrección correspondiente.
- Gráfica. Basado en la representación de los valores numéricos obtenidos en un polígono multicriterial. En éste quedan acotados en una serie de campos los escalares de acuerdo con su grado de afección. La incorporación del resultado numérico final al cálculo gráfico dota al variograma de mayor expresividad.

Veamos cómo se genera el nuevo polígono de evaluación multicriterio:

- **Cálculo numérico**

El **cálculo numérico** consta de una serie de etapas procedimentales, aplicable a todos los indicadores de **presión y de estado** previamente jerarquizados por su importancia. La metodología propuesta sería como sigue:

- 1). Elección de los indicadores más relevantes para cada situación específica. En el caso de caracterización de los humedales de la *Cubeta* es conveniente adoptar la totalidad de los indicadores propuestos.
- 2). Jerarquización de los indicadores de acuerdo con su magnitud. Este proceso se lleva a cabo partiendo de la información recogida en el variograma de evaluación de la caracterización (Figura 4.47).
- 3). Aplicación del sistema de rangos-pesos a cada indicador de estado y presión. Los baremos correspondientes fueron establecidos en la definición de cada indicador.
- 4). Atribución de un factor de ponderación o corrección a cada indicador en función de su *índice de incidencia*, es decir, la importancia relativa de cada indicador para el fin propuesto. En la práctica, el factor corrector es un multiplicador para asignar un peso apropiado a aquellos indicadores de impactos acumulativos o sinérgicos. Por ejemplo, una situación de sequía prolongada provoca un impacto el segundo año mayor del doble que en el primero. Estos coeficientes han sido establecidos en la definición de los indicadores, y quedan mencionados al pie del polígono de evaluación multicriterio, si bien numéricamente pueden ser considerados “provisionales”.
- 5). Una vez obtenidos los productos de los rangos de cada indicador por su peso, y aplicado su correspondiente factor de ponderación, se calcula el sumatorio de los productos de todos los indicadores. El resultado corresponde al indicador final de la evaluación medioambiental del humedal.

Con estos resultados se procede a la representación gráfica del variograma.

- **Representación gráfica**

La **representación gráfica** se manifiesta como un "*polígono de evaluación multicriterio*."

Una vez obtenidos los valores numéricos de los niveles de ponderación de los indicadores de estado y de presión, su representación se lleva a cabo en tres etapas consecutivas:

- 1). Sombreado o coloreado de las categorías hasta el máximo nivel de ponderación.



Los baremos tienen entre cuatro y seis categorías dependiendo del indicador. Las valoraciones son integradas dentro de los baremos representados gráficamente, de modo que el impacto, además de quedar definido por una magnitud escalar, queda integrado en un grado de afección.

- 2). Trazado de la polilínea envolvente que bordea los campos sombreados del polígono de evaluación multicriterio.
- 3). Asignación del valor numérico final a cada indicador para dotar al diagrama de una mayor precisión.

El variograma representa, por un lado, el producto final de un cálculo secuencial y consecutivo que ha llevado a calcular un nivel de ponderación para cada indicador; y por otro, un instrumento de seguimiento de la evolución de los "elementos clave" del sistema a lo largo del programa de vigilancia y control. A este respecto cabe destacar las siguientes cuestiones:

El polígono de evaluación multicriterio (=variograma) relaciona factores y procesos con el medio, adquiriendo un **carácter matricial**. Los intervalos del sistema de rangos-pesos han sido y establecidos de forma arbitraria en base a conceptos técnicos y experiencias empíricas, según se explica en la definición de los indicadores.

La asignación de un **peso** a cada **rango** da cierta cabida a la subjetividad, si bien la mayoría de los indicadores son resultado de un cálculo realizado en campo o una determinación directa, como puede ser la concentración en nitratos, cloruros, porcentaje de finos en una muestras de suelo, etc. En cambio otros dejan una cierta capacidad de maniobra al evaluador (evaluación socioeconómica, procedencia política, etc).

Inicialmente el variograma refleja el estado de los elementos medioambientales del sistema considerados de mayor valor, cuya **temporalidad** está supeditada a las operaciones de recarga artificial.

El resultado final desprende un **valor numérico** del estado evolutivo de la actividad, humedal o elemento clave, y una **polilínea** que acota por encima los campos sombreados de cada grado de afección en el diagrama. Ambos pueden ser empleados como indicadores medioambientales.

El estudio de la variación del producto final o de la polilínea a lo largo del tiempo posibilita observar la evolución de la afección por la variación de los indicadores, mediante la simple sobreposición de plantillas de acetato o transparencias elaboradas en distintas fechas, lo que permite ver las diferencias cualitativas y la evolución temporal del humedal o elemento clave. El estudio de la evolución servirá de herramienta para la toma de decisiones y la aplicación de nuevas medidas correctoras.

Este polígono debe ser **actualizado** a medida que se obtengan nuevos datos, parámetros e indicadores.

El carácter dinámico inherente al polígono conlleva la posibilidad de su modificación para unos fines determinados mediante su **adaptación a otros contextos** o lugares de aplicación.

En el anexo 4.6 se presenta el polígono diseñado, como histograma de barras horizontales. Se ha presentado en un tomo independiente para permitir su consulta simultánea. El polígono es subdividido en dos partes. Por un lado, se valoran los indicadores de estado y por otro los de presión. La evaluación de cada impacto se lleva a cabo aplicando el sistema de rangos-pesos definido al pie del histograma para cada indicador, y aplicando al factor de corrección especificado.

En el Anexo 4.6 se presentan los polígonos de evaluación multicriterio de los humedales del sistema que tienen una mayor probabilidad de ser regenerados mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos: Laguna de la Iglesia y de las Eras para la situación de febrero de 2004. Los indicadores de respuesta no han sido agregados, dado que el sistema se basa en la experiencia en un dispositivo que lleva funcionando dos años hidrológicos.

El cálculo numérico resultante es de 2.035 para la Laguna de la Iglesia y de 1.835 para la de las Eras con respecto a los datos tomados en febrero de 2004.

Cualquier aumento de estos valores conlleva la procedencia de estudiar sus causas y tomar las medidas oportunas, corrigiendo el tipo de actuaciones que afectan a un impacto específico. Por el contrario, si el valor decrece en mediciones consecutivas es indicativo de que las operaciones de recarga artificial están contribuyendo positivamente a la restauración de estos enclaves degradados.

Dada la multiplicidad de circunstancias que pueden concurrir, el polígono puede ser modificado para cada caso concreto.

El variograma diseñado permite su programación en una *macro* o programa para la obtención automática del polígono de evaluación multicriterio. Esta macro será colocada en Internet, con objeto de que pueda ser empleada por los posibles usuarios, de modo que tecleando los datos de campo, operaciones y evaluaciones necesarias, el programa llevará a cabo el cálculo numérico de cada indicador y generará el polígono de evaluación multicriterio para una fecha determinada.

6.4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA EN UN ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (E_sIA)

De acuerdo con lo dispuesto en la Directiva 2000/60/CE, cualquier actuación que conlleve variaciones en la calidad de las aguas debe contar con una norma de calidad medioambiental que tenga un planteamiento combinado y refleje fielmente el estado ecológico de las aguas. Para ello es preciso que sean prefijadas las condiciones de referencia específicas. Según esto, cada tipo de masa de agua superficial debe contar con una caracterización de las condiciones hidromorfológicas y fisicoquímicas, cuya evolución sea detectada por variaciones en el valor de los indicadores de calidad hidromorfológicos y fisicoquímicos. Para las condiciones de referencia biológicas específicas del tipo con base espacial, “*los Estados miembros crearán una red de referencia para cada tipo de masa de agua superficial.*” Dicha red contendrá un número suficiente de puntos y medidas de los indicadores de calidad, o, en su defecto, se aplicará la modelización para fijar condiciones de referencia fiables. Los indicadores elegidos no podrán tener un alto grado de variabilidad natural (Fdez. Escalante y Cordero, 2001).

El seguimiento del estado de humedal o elemento clave a lo largo del tiempo puede considerarse positivo si el resultado del cálculo matricial no aumenta con el paso del tiempo o la polilínea es desplazada en alguno de sus segmentos hacia la izquierda. Un incremento en los valores o desplazamiento de la envolvente hacia la izquierda manifiesta que algunos de los impactos que operan sobre el medio se han agravado en un período determinado.

En base a estos dos criterios básicos, las mejoras en el sistema indican que la política proteccionista inicialmente planificada o las operaciones de generación hídrica se encuentran en el camino apropiado. En caso contrario, es preciso llevar a cabo un análisis de las alternativas, bien sean preventivas o correctoras, para minimizar la cuantía de los impactos.

Las alternativas presentadas se configuran como técnicas, y dependiendo del impacto, intensidad y escala será preciso adoptar las medidas correctoras más idóneas de acuerdo con el fin pretendido. Estas líneas se perfilan como las principales ramas en que se divide el fundamento de las técnicas de tratamiento del suelo y del acuífero o *Soil Aquifer Treatment* (SAT), o conjunto de operaciones que pueden ser realizadas sobre el suelo, acuífero o aguas para aumentar la efectividad de las instalaciones de recarga artificial (AR), y, por ende, la regeneración de los humedales objeto de tratamiento por derivar aguas de AR para objetivos medioambientales.

Otra línea de actuación inherente a las técnicas SAT es el diseño de estructuras apropiadas para los fines previstos. A este respecto hay que señalar que todo diseño de estructuras debe ser planificado y diseñado cuidadosamente, en aras de minimizar los procesos colmatantes, facilitando la aplicación de las técnicas precisas. Requiere además un mantenimiento posterior simultáneo a la recarga y al terminar el ciclo de recarga, especialmente en acuíferos detríticos arenosos con movilización de arcilla. En la literatura de suelos el movimiento y acumulación de partículas arcillosas finas en el acuífero que progradan en profundidad es combatido mediante técnicas de tipo “*wash*

out-wash in” (Sumner & Stewart, 1992), consistentes en la inversión del sentido de flujo de las aguas de recarga en el circuito, con objeto de extraer las partículas por la misma zona por donde entraron.

La justificación de la solución adoptada debe ir acompañada de una justificación técnica de las medidas adoptadas. En general, la mayoría de las actuaciones SAT van vinculadas a una serie de medidas que traen como consecuencia impactos adicionales, si bien su escala e intensidad son menores que el efecto de los impactos que se pretende corregir. Para ello resulta preciso aplicar técnicas de optimización entre los procedimientos de operación y el mantenimiento de las estructuras.

Algunas de las manifestaciones que acompañan a las medidas correctoras y su impacto asociado son:

- Necesidad de construir determinadas obras y estructuras lineales, tales como una vía de servicio o dispositivos de recarga. Éstos tienen un efecto barrera asociado importante que constituye una afección para la fauna y otros elementos clave.
- Instalación de cercados, vallas y dispositivos disuasorios, con el consecuente efecto barrera y en ocasiones desacuerdo popular ante las actuaciones emprendidas.
- Tendidos eléctricos, construcción de diques, trazado de tuberías, etc. La mayoría de las técnicas SAT conllevan en cierta medida una obra civil, que genera un impacto durante las labores de construcción y, generalmente, también con posterioridad.

Todos los aspectos relativos a técnicas SAT y propuestas de aplicación a la *Cubeta* se presentan en el Bloque 5. Por tanto, el cometido de este apartado ha sido presentar unas líneas de actuación operativas para la realización de técnicas SAT que requieran un EsIA.

6.5. DISEÑO DE UN PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL

El programa de Vigilancia ambiental o bien de Vigilancia y Control debe contar con propuestas de medidas genéricas (preventivas, correctoras y compensatorias) y actuaciones concretas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos (*Gómez Orea, 1999*).

La previsión de los posibles impactos contraintuitivos no siempre es posible, por tanto, resulta conveniente articular una serie de medidas para su inmediata detección cuando concurran integrados en el Programa de vigilancia y control y otras medidas consideradas de emergencia contenidas en el diseño de un **Programa de Emergencia**.

6.5.1. Actuaciones concretas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos

Las medidas preventivas, protectoras, correctivas, potenciativas o compensatorias deben ir apoyadas en la legislación medioambiental vigente y en experiencias previas resultantes de aplicar la técnica de escenarios análogos. En este apartado se presentan ciertos procedimientos operativos para la realización de estudios y evaluaciones de impacto ambiental, postergando para el Bloque 5 su aplicación concreta a la Cubeta de Santiuste.

En principio, y antes de diseñar un sistemas de medidas compensatorias, consideramos preciso un soporte basado en las siguientes cuestiones:

- Definir con exactitud el funcionamiento hidrogeológico del sistema y su vulnerabilidad.
- Prever las posibles afecciones que pudieran causar la recarga artificial y actividades colaterales en cuanto problemas de cantidad y calidad de las aguas subterráneas y ecosistemas hidrodependientes relacionados.
- Presentación de una serie de indicadores para la identificación y valoración de impactos desde un enfoque hidrogeológico.
- Diseñar un informe de consulta vinculado al “corolario de normas técnicas” que presente diversas opciones para el examen de alternativas y la toma de decisiones relativas a la proposición de medidas protectoras y correctoras, realización de actividades compensatorias y elaboración de un programa de vigilancia ambiental utilizando los indicadores medioambientales establecidos, todo ello desde un enfoque hidrogeológico.

Para ello sería aplicable el sistema de indicadores ambientales propuesto. Este sistema debe ser dinámico, y su diseño será calibrado a medida que avance el conocimiento del medio físico y su evolución.

En este apartado se presenta una serie de **alternativas** que cumplen los requisitos establecidos y que constituyen líneas de actuación SAT de primer orden que

están siendo aplicados con mayor o menor éxito en diferentes zonas del mundo con desarrollo de operaciones de AR.

La elección de medidas protectoras y correctoras desde un **enfoque hidrogeológico** deberá realizarse en base a la caracterización hidrogeológica de la situación inicial, la vulnerabilidad del acuífero y su entorno y la previsión de las afecciones.

El principio, las medidas protectoras aplicables a la etapa preoperacional deben basarse en el principio de “*prevención del daño en origen*” contemplado en el artículo 130 R del *Acta Única (DOCE, 1987)* y en el “*principio precautorio*”. En las restantes etapas las medidas correctoras están relacionadas con la respuesta del sistema ante las actuaciones.

Las medidas correctoras concretas para cada tipo de afección para las etapas operacional y de vigilancia ambiental se indican a continuación:

A). Medidas correctoras sobre el funcionamiento hidrogeológico inicial

- Balsas, fosas y zanjas de recarga.
- Barreras de impermeabilización.
- Cunetas perimetrales en el dispositivo y vía de servicio ante posibles inundaciones y entrada de finos al sistema.
- Eliminación del drenaje de los humedales.
- Reorganización del drenaje ante el riesgo de inundaciones.

B). Medidas correctoras sobre los recursos hídricos

- Recarga y reposición de los recursos detraídos.
- Tratamiento previo a la introducción a los dispositivos de AR.
- Evitar la erosión y acarcavamiento de los taludes mediante geotextiles y/o obras de protección. En el caso de humedales la revegetación con especies xerófilas y aclimatadas a regiones con pocas precipitaciones se perfila como la medida más idónea.
- Dispositivos de alarma para la evacuación de caudales extraordinarios.

C). Medidas correctoras sobre la calidad

- Balsas de decantación y filtros.
- Drenaje rápido o filtración de las aguas superficiales, evitando la mezcla.
- Reducción de la superficie expuesta a la interacción agua-aire.



- Evitar el efecto cascading para minimizar la oxigenación de las aguas de recarga.
- Implantación de filtros verdes y represas de arcilla.
- Corrección de quimismos ácidos con lechos de calizas o adición alcalina (puede ser por contacto, goteo o mezcla).
- Inhibición bacteriana mediante técnicas físico-químicas.
- Control de materias en suspensión.
- Dispositivos de alarma para la evacuación de contaminantes.
- Posibilidad del empleo de mecanismos para la degradación de TOC mediante bacterias indígenas (no inhibidas).
- Proporcionar electrones aceptores en zonas donde predominan procesos reductores.

Como actividad **potenciativa** cabe destacar la importancia de la información, divulgación y educación ambiental para que este tipo de "técnicas especiales" se conviertan en técnicas habituales. Algunas de las actuaciones propuestas en esta línea son:

- Campañas de divulgación de los valores de los humedales en el mundo rural.
- Potenciación del uso tradicional de los humedales, asegurando un beneficio a las localidades donde están ubicados (*Rey Benayas, 1991*).

A éstas cabe añadir dos medidas adicionales, que son la protección legal de los humedales y el inicio de campañas de educación ambiental. En ellas, además de potenciar los aspectos divulgativos y procedimentales, cabe ensalzar la inculcación de valores actitudinales como elemento inherente a la educación ambiental.

Existe un tipo de medidas cuyo carácter impide su inclusión en un grupo determinado, que son las **limitativas**. Se trata de una tipología que engloba los diferentes tipos de actividades. Este tipo de medidas podrían figurar en los Planes de Ordenación Territorial o bien en la Declaración de Impacto Ambiental.

Algunas de las medidas a aplicar podrían vincularse a los siguientes parámetros o sistemas en el ámbito de aplicación del *Complejo*:

- Condicionantes sobre la superficie afectada (establecer límites o una tasa de superficie afectada respecto a la superficie total).
- Sobre el descenso del nivel freático en las inmediaciones de los humedales (limitar la profundidad de la depresión del nivel, de modo que quede limitada la depresión en el entorno y, como consecuencia, los caudales extraídos).



- Sobre la distancia entre los elementos, como puede ser humedales y pozos de extracción (establecer límites para la densidad de captaciones en función de los radios de influencia de las depresiones, de manera que se evite la suma de afecciones).
- Sobre la distancia entre la actuación y los cauces fluviales, dejando una zona intacta que actúe como filtro natural.
- Sobre las captaciones ubicadas en zonas con incidencia sobre la vegetación freatofítica (cuenca y playa de los humedales). En la zona se han detectado ciertos humedales que cuentan con sondeos de extracción en el mismo cuenco de la laguna, como es el caso del humedal nº 43 del inventario.
- Sobre la magnitud de los caudales extraídos (posibilidad de suministrar la demanda desde una única captación o varias y su/s caudal/es de extracción.
- Sobre la calidad de las aguas que se devuelven a los ríos mediante aliviaderos, en base a las normas y parámetros físico-químicos establecidos en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y en las leyes autonómicas sobre vertidos.
- Sobre la calidad de las aguas empleadas para la recarga artificial de acuíferos, con dispositivos para cortar la entrada al cauce en caso de avenida extraordinaria, vertido accidental o cualquier circunstancia que conlleve un deterioro cualitativo de las aguas no considerado *a priori*.
- Sobre la cota de aspiración del agua en los dispositivos de AR inducida, teniendo en cuenta que las aguas más frías se encuentran a una profundidad dependiente en gran medida de la época del año, y que las más cercanas al fondo suelen ir acompañadas de gran cantidad de arrastres.
- Sobre el sistema de filtrado de las aguas de recarga y reciclaje, con tendencia a instalar macizos filtrantes de grava en las balsas de decantación.
- Sobre la evolución de las dimensiones de los dispositivos (área ocupada, zona de protección, altura total, pendiente de los taludes, etc.).

En definitiva, todas las medidas presentan un factor común, que es el diseño e instalación de todos los elementos de manera que sea minimizado el impacto global.

Como actividades **potenciativas** se propone una serie de medidas concretas, más aplicables en períodos sinoperacionales y postoperacionales que en estadios iniciales. Estas medidas serían simultáneas al período de vigilancia ambiental, y constituyen actuaciones clave que deben quedar contenidas en el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN), que por Ley debe ser diseñado en caso de llevarse a cabo la restauración de ciertos humedales del *Complejo* y su atribución de una figura de protección suficientemente restrictiva en cuanto a usos se refiere como para conseguir la preservación de su estado en aras del desarrollo sostenible y del legado a las nuevas generaciones.

En cuanto a la restauración de humedales, el objetivo al llevar a cabo labores de restauración es conseguir una alta biodiversidad desde las primeras etapas, aportando la mayor heterogeneidad posible y favoreciendo la presencia de microhábitats diferenciados, que permitirán el asentamiento de comunidades vegetales y animales diversas lo más similares posible a las existentes en épocas pasadas (*Hammer, 1996*). Los humedales que adquieran un valor ecológico suficiente deben contar con una Zona de Restricción en torno cada una de las lagunas, con tres subzonas interiores: “Zona de Restricción Absoluta (ZRA), Zona de Restricción Máxima (ZRM) y Zona de Restricción Moderada (ZRm), referenciadas geográficamente (*CMA JA, 2001*).

Algunas de las actuaciones propuestas son las siguientes:

- 1). Adquisición de terrenos por parte de la *Administración* alrededor de cada laguna o bodón.
- 2). Sustitución del cultivo actual. Se refiere a la erradicación de especies alóctonas dentro de las ZRA de las lagunas a recuperar, sean cultivadas o no.
- 3). Potenciación de la cobertura herbácea y arbustiva mediante proyectos de restauración ambiental de margen de laguna (carrizales, etc.) en la ZRA, con el fin de crear una barrera vegetal que frene el viento, capte los arrastres de materiales realizados por el mismo viento, por la escorrentía laminar o en regueros. Esta ZRA incluye una franja de protección bilateralmente durante 10 metros a lo largo de los arroyos tributarios.
- 4). Naturalización de la vegetación circundante a las lagunas, mediante la plantación de especies autóctonas halófilas e hidrófilas dentro de la ZRA, que recupere la vegetación anterior al establecimiento de los cultivos.
- 5). Construcción de caballones, motas o fajinas de pequeña alzada para evitar procesos erosivos debidos a la carencia de vegetación. Estos elementos podrían ser contruidos con tierra replantada o bien con piedra del lugar que minimicen el impacto visual, de manera discontinua (al tresbolillo). Estos elementos han probado su efectividad interceptando la escorrentía laminar o en regueros y frenando la velocidad de las aguas (*Magister, 1982; CMA, 2001*). Estas barreras contra la erosión recogerían los arrastres de las mismas, frenando la movilización de sedimentos. También se contempla la posibilidad de intercalar estas estructuras con pequeños diques y albarradas. Esta actuación se realizará dentro de las zonas ZRA y ZRM.
- 6). Prácticas de conservación en cultivos: Se restringirán los períodos hábiles para realizar el laboreo, evitando su concurrencia con temporadas anuales de mayor posibilidad de aguaceros extraordinarios. Esta actuación está indicada para las zonas ZRM y ZRm. La elaboración de un adecuado código de buenas prácticas agrarias contemplará también las dosis de agroquímicos y fitosanitarios permitidas en las zonas ZRM y ZRm, aplicando el criterio de “la mínima cantidad posible.”
- 7). Sustitución paulatina de las explotaciones de regadío adyacentes a los

humedales por seco, trasladando los regadíos a zonas más idóneas. La concentración parcelaria de los terrenos facilita estas operaciones de gestión sin desfavorecer a determinados agricultores. Esta actuación está indicada para las zonas más próximas de la ZRM a la ZRA.

- 8). En cuanto a la posibilidad de implantar dispositivos desarenadores en los cauces principales de aportación a las lagunas, estas instalaciones no tendrían un rendimiento elevado debido al tipo de sedimentos, a la topografía de las zonas circundantes a las lagunas y al impacto visual que generarían. No obstante, no se descarta la posibilidad de su implantación si el efecto de las restantes actuaciones propuestas fuesen insuficientes para aminorar por sí solas la aportación de finos a las lagunas.
- 9). Instalación de balizas niveladas en la zona más profunda del cuenco de las lagunas que permitan la medición de la altura de la lámina de agua a distancia con prismáticos. Estas estacas deberán tener una cimentación sólida y plana para evitar basculamientos y estar cimentada sobre el material más endurecido de los depósitos, por lo que es preciso que estén clavadas al menos un metro sobre el fondo.
- 10). Cerramiento del drenaje de las algunas, con un movimiento de tierras planificado que devuelva en la medida de lo posible sus características naturales a la zona.
- 11). Limpieza de vertidos de residuos sólidos y asimilados en las reservas.
- 12). Vallado del perímetro de ambas lagunas (zona de restricción absoluta) mientras se desarrollan las actividades de sustitución del cultivo actual, contemplando la posibilidad de que el área quede delimitada físicamente de forma permanente, facilitando así su restauración natural, impidiendo la extracción de agua de la laguna.
- 13). Implantación de cartelería informativa, preceptiva y disuasoria.
- 14). Implantación de un programa de vigilancia y control.

6.6. PROPUESTAS PARA LA ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA DE VIGILANCIA Y CONTROL

Constituye un grupo de instrumentos necesarios para seguir la premisa del mínimo impacto. Con objeto de estudiar la evolución del estado ecológico de los **humedales** a lo largo del tiempo, es preciso el seguimiento como mínimo de los siguientes aspectos:

- 1). Control de evolución del nivel del agua de la laguna mediante la observación con prismáticos y desde la orilla de la baliza indicadora, a cargo de la guardería encargada. La cadencia debe ser como máximo trimestral.

- 2). Control de la evolución cualitativa del agua, mediante un análisis que además de los macroconstituyentes refleje la concentración en nutrientes y pesticidas. Este análisis se efectuará al menos con una periodicidad semestral los dos primeros años.
- 3). Simultáneamente y con objetivo de estudiar cualquier interferencia se realizarán aforos directos en los arroyos que desembocan en las lagunas.
- 4). La limpieza de finos decantados en el embalse de decantación es precisa, y debe ser realizada en función de las precipitaciones y del régimen hídrico anual.
- 5). Realización de inventarios de flora y fauna previos a las actuaciones previstas, con objeto de estudiar su evolución en el tiempo.
- 6). Vigilancia ocular de la superficie del perímetro, de cara a detectar en el momento las posibles obras de captación, derivaciones, alteraciones, perforaciones, movimientos de tierras, etc., que se pudiesen iniciar. Esta medida debe ser realizada de forma diaria por la guardería forestal.
- 7). Vallado del perímetro de la laguna (zona de restricción absoluta) mientras se desarrollan las actividades.
- 8). Implantación de cartelería informativa y preceptiva.

El seguimiento de estos parámetros conlleva la vigilancia ocular diaria de la superficie de influencia, para detectar cualquier irregularidad que se manifieste en superficie.

La vigilancia es contemplada en el Art. 8 y en el Anexo 5.1. de la DM. Según ésta, cualquier evolución del estado ecológico debe ser detectada mediante el *“Seguimiento del estado de las aguas superficiales, del estado de las aguas subterráneas y de las zonas protegidas.”* Para ello son propuestas unas normas básicas para el diseño de programas de seguimiento del estado de las aguas, que en el caso de las “zonas protegidas” los programas se completarán con las especificaciones contenidas en la norma comunitaria, en virtud de la cual se haya establecido cada zona protegida.

El control de vigilancia se especifica en el Anexo 5, aptdo. 1.3.1. indicando que debe realizarse anualmente y en cada punto de control, dentro del período que abarque el PHC, medición y cálculo de los parámetros representativos de todos los indicadores de calidad biológicos, hidromorfológicos, fisicoquímicos, lista de los contaminantes que se descargan en la cuenca o subcuenca.

La actividad requiere la incorporación de una figura, el *“Responsable Técnico de Medio Ambiente”*, que será el responsable del control de la realización de las medidas correctoras, en las condiciones de ejecución, medición y abono previstas, y de proporcionar a la Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León y a la Consejería de Medio Ambiente memoria actualizada de las actividades controladas, tales como:

- Supervisión del proyecto.
- Cumplimiento de prescripciones de la Declaración de Impacto Ambiental.
- Análisis del sistema hidrológico, incluyendo los procesos contaminantes.
- vegetación de zonas sensibles.
- Operaciones de mantenimiento ordinarias y extraordinarias.
- Caudales de aporte a las lagunas endorreicas.

Durante esta fase se habrá de controlar, mediante unos parámetros de seguimiento, las evoluciones en la piezometría y calidad de las aguas.

6.7. DISEÑO DE UN PROGRAMA DE EMERGENCIA

El diseño de un programa de emergencia para paliar el impacto negativo de los efectos contraintuitivos o bien bajo situaciones anómalas corresponde a un imperativo legal establecido en distintas disposiciones legales. por ejemplo, el RLA en su Artículo 251 dictamina que "en las autorizaciones de vertido se concretará especialmente:

(...)

f) Las actuaciones y medidas que, en casos de emergencia, deban ser puestas en práctica por el titular de la autorización."

El grupo de medidas correctoras para su aplicación en situaciones hipotéticas extremas quedan establecidas en el Plan de Emergencia para actuar contra situaciones de sequía prolongada, lluvias torrenciales, derrame de contaminantes o incidente ambiental, situación de abandono y clausura. Estas medidas correctoras deben adaptarse a las características hidrogeomorfológicas de la zona (relieve, accesos, cercanía a poblaciones, etc.) y al programa de seguimiento y control.

En dicho Plan debe figurar el técnico responsable del programa.

Para una situación hipotética en la que pueda presentarse un proceso contaminante, como puede ser un importante derrame de combustible, vertido, incendio forestal, etc., entraría en funcionamiento el **Plan de intervención**, elaborado teniendo en cuenta las disposiciones recogidas en los planes de Seguridad Social y Seguridad y Salud. Este Plan de intervención contemplará, por lo menos, los siguientes puntos:

- Servicio centralizado de control, conocedor de las características del agua.
- Plan de intervención inmediato, con capacidad de actuar paralizando el bombeo o derivación de las aguas del cauce fluvial de forma inmediata si fuera preciso.
- Sistema de lucha contra la contaminación. El sistema a aplicar dependería del contaminante detectado.

El Plan de intervención requiere un servicio centralizado de control que sea buen conocedor de las características de la zona y con capacidad para actuar cuando sea preciso.

El programa de vigilancia y el de emergencia conlleva la necesidad de disponer,

tanto en la fase de construcción como en la explotación, de los recursos técnicos y económicos precisos para su ejecución. Es necesario, por tanto, que se establezcan canales de colaboración entre todos los estamentos implicados en el desarrollo del proyecto y de gestión de la reserva, con el objeto de delimitar las responsabilidades y funciones a realizar en las labores de seguimiento.

6.8. PROPUESTAS PARA EL DISEÑO DE UN CÓDIGO DE BUENAS PRÁCTICAS RELATIVO AL SISTEMA DE RECARGA

Los códigos de buenas prácticas, aunque gozan de autonomía, están vinculados a la implantación del programa de vigilancia ambiental hasta el punto de que la mayoría de los objetivos planteados pueden constituir partes integrantes del código.

En dicho código deben quedar contemplados, al menos, los siguientes puntos:

- Control de evolución del nivel del agua de la laguna, mediante la observación con prismáticos y desde la orilla de la baliza indicadora, con una periodicidad al menos trimestral.
- Control de la evolución cualitativa del agua mediante un análisis que, además de los macroconstituyentes, refleje la concentración en nutrientes y pesticidas. Este análisis se efectuará al menos con una periodicidad semestral los dos primeros años.
- Estudio de las interferencias entre procesos mediante la realización de aforos directos en los arroyos que desembocan en las lagunas, análisis de aguas, etc.
- Limpieza periódica de los dispositivos de decantación y filtración.
- Realización de inventarios de flora y fauna previos a las actuaciones previstas, con objeto de caracterizar el entorno preoperacional y poder aplicar un sistema de bioindicadores para el seguimiento de su evolución.
- Vigilancia ocular de la superficie del perímetro, de cara a detectar en el momento las posibles obras de captación, derivaciones, alteraciones, perforaciones, movimientos de tierras, etc., que se pudiesen iniciar. Esta medida podría ser realizada de forma diaria por la guardería forestal.
- Elaboración de un Plan de Intervención inmediato para el supuesto de incendios, derrame de contaminantes, etc., con capacidad de actuar si fuera preciso.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

De todos los aspectos estudiados se extraen algunas conclusiones genéricas y específicas.

El valor de los humedales

Los humedales del Complejo de Coca-Olmedo representan unos elementos singulares que antiguamente gozaron de gran valor ecológico y funcional. Esta distinción ha sido perdida por efecto de variados impactos ambientales, siendo procedente llevar a cabo estudios tendentes a su restauración y protección como si de un único sistema se tratara.

Analizando las causas que han contribuido a la degradación de estos humedales, el proceso destructivo más importante ha sido la sobreexplotación del acuífero, como consecuencia de la implantación de nuevos regadíos (*De Meers, 1992*), así como el desconocimiento de la génesis de los humedales y el menosprecio de sus valores y funciones (*Rey Benayas, 1991*). De cualquier modo, concurren gran cantidad de impactos, en muchas ocasiones acumulativos y sinérgicos, que han requerido el estudio de escenarios análogos de todo el mundo para su detección.

La restauración de los humedales

En vista de la enorme cantidad de factores involucrados, la restauración de un humedal no puede ser una actuación exclusivamente hidrológica. Por ejemplo, según algunos autores, los factores hidrogeológicos, más el clima y la topografía constituyen los factores genéticos de los hábitats de descarga de aguas subterráneas (*Rey Benayas, 1991*).

La mayor parte de los humedales del *Complejo* corresponden a charcas aisladas en áreas de recarga planas, con forma circular, tamaños pequeños (10-30 m. de diámetro), aisladas de la red de drenaje superficial y con frecuencia presentan manifestaciones de salinidad del suelo.

Criterios de clasificación

Los humedales pueden ser clasificados por diversos criterios, como son por su génesis, litología e hidroquímica, ecología, morfometría, conexión con acuíferos, grado de protección, etc. De todas las clasificaciones estudiadas se ha echado de menos una clasificación basada en el estado de conservación y funcionamiento ante impactos ambientales, en general antrópicos, criterio considerado clave para estudiar la viabilidad práctica para llevar a cabo operaciones de regeneración hídrica y ecológica y poder gestionar programas de regeneración y para la toma de decisiones. De acuerdo con este criterio, se han diferenciado cuatro tipologías de humedales según su estado actual y viabilidad de recuperación. De menor a mayor afección se han diferenciado humedales azules, amarillos, naranjas y rojos.

Identificación de impactos

El estudio del entorno preoperacional y de su evolución puede ser llevado a cabo siguiendo a modo de “guión” las pautas marcadas por la legislación, en concreto el RD 6/2001 para la realización de Estudios de impacto Ambiental, con todas las fases consecutivas que prevé.

Los procesos de identificación de impactos pretéritos y los previsibles asociados a las labores de recarga artificial constituyen un importante volumen. La detección de los más significativos y la elaboración de una *ficha tipo* o matriz de identificación específica permite realizar estudios futuros en escenarios análogos con mayor facilidad.

Es preciso la participación de un equipo pluridisciplinar que evalúe la conveniencia de las medidas de actuación de forma integrada, así como contar con la colaboración de la población local.

La restauración de humedales mediante técnicas de AR

La recarga artificial (AR) **inducida** se perfila como una técnica apropiada para la recuperación de humedales hidrodependientes, cuya calidad de las aguas está condicionada por factores hidrogeológicos específicos, en general asociados a la evolución hidroquímica de las aguas en un modelo de acuífero regional de borde de sierra, donde hay identificados flujos profundos, intermedios y locales. De este modo la mineralización del agua subterránea a lo largo de las trayectorias de flujo es distinta en cada caso, afectando, por tanto, a las características de los suelos y de las comunidades vegetales de los humedales (*Rey Benayas, 1991*).

La aplicación de técnicas de AR inducida en este caso concreto se basa en determinar una trayectoria de flujo natural de acuerdo con un modelo conceptual tipo *Tóth*, diseñando una trayectoria artificial que simule o corresponda a la natural lo más posible en cuanto al producto final, es decir, la salinidad de las aguas. Estas actividades traen consigo importantes inconvenientes y problemas técnicos que es preciso solventar.

Para ello es preciso realizar estudios de solubilidad del suelo y del tiempo de tránsito, aplicando cálculos darcinianos en los que intervienen nuevas variables, tales como el tamaño y morfología de los lentejones salinos, la solubilidad de los distintos materiales del acuitardo y las líneas de flujo naturales y artificiales tras la inducción.

En general existen dos tendencias principales de variación de las características químicas del agua subterránea de acuerdo con su circulación por el acuífero regional. En aguas jóvenes predomina una tendencia relacionada con el aumento de conductividad e “iones fuertes” (SO_4^- , Cl^- , Na^+), adquiriendo una alta “mineralización global.” La segunda está más relacionada con procesos de “alcalinización” o “mineralización por envejecimiento.” Aparentemente coexisten varias fases estables en las líneas de flujo. El estudio de las distintas tendencias al hacer un análisis multivariante manifiesta fuertes variaciones en la concentración de carbonatos, de ahí su idoneidad para ser empleado como indicador para el control de determinados ambientes.

Una técnica hidroquímica de interés para el diseño y estudio de operaciones de recarga inducida es el *Path models*, mediante el análisis de las trayectorias seguidas por las líneas de flujo se determina la salinidad y el contenido iónico total final.

En las zonas de descarga se forman con frecuencia eflorescencias y precipitados alcalinos y/o salinos y erosión del horizonte *A* orgánico, formando los denominados “*salgüeros*.” Este proceso de formación de salgüeros es dinámico, y ocurre en posiciones intermedias de la pendiente del humedal, probablemente debido a una *distancia crítica* entre la franja capilar y superficie del suelo (*Rey Benayas, 1991*). Dado que la distancia crítica es de escala centimétrica, resulta inviable su aplicación a operaciones de AR de escala regional. La máxima concentración de sales se produce en la zona intermedia, por tanto, hay un balance entre la infiltración y evapotranspiración, de modo que la concentración de sales puede verse disminuida.

Un tema adicional a tener en cuenta es la alta **salinidad** de los humedales, tanto actuales como fosilizados. Los actuales pueden ser considerados humedales relicticos persistentes de alto valor ecológico. Los humedales antiguos fosilizados por arenas detectados en las inmediaciones de Ciruelos de Coca y Villeguillo provocan la movilización de fuertes concentraciones de iones salinos presentes en el medio conjuntamente con las aguas subterráneas.

Adopción de técnicas para reducir los impactos

Algunas técnicas SAT se perfilan como medidas efectivas para paliar el efecto de estos impactos, como, por ejemplo, sería el dragado somero de los terrenos inundados por las lagunas cuando el grado de colmatación alcanzado lo requiera, proporcionando materiales para forzar procesos de interacción agua-suelo durante las actividades de recarga inducida. Las actividades diseñadas cuentan además con severas amenazas que pueden ser considerados impactos. Entre éstos cabe destacar el incremento de la colmatación en los dispositivos, bien sea natural o inducida por el hombre. Este impacto conduce inexorablemente a la desecación de los humedales (*Temiño, 1995*).

Otra técnica para impedir la movilización de sales no deseada es la reducción de la recarga natural mediante barreras impermeables, etc, técnica difícil de llevar a cabo.

Otro efecto importante es la interacción con **compuestos orgánicos** introducidos por el vertido de aguas residuales y abandono o enterramiento de animales muertos. El vertido y movilización de iones en zona no saturada ha requerido la elaboración de estudios específicos con objeto de determinar si la recarga resulta beneficiosa por dilución de estos contaminantes o bien conocer si su interacción con los iones acumulados en la zona no saturada puede presentar efectos medioambientales acumulativos e incluso sinérgicos, esperando un “pico” contaminante que remitirá años después por dilución. De acuerdo con *Llamas et al, 2001*, una solución adecuada sería conseguir una mayor implicación por parte de las administraciones locales, titulares de aprovechamientos privados, asociaciones conservacionistas y de la comunidad científica en la elaboración de los Planes de Ordenación.

La utilización de aguas superficiales y residuales asociadas al esquema hidráulico de empleo de las aguas subterráneas vinculadas a operaciones de AR pone en relieve la importancia de la técnica en determinados climas y zonas (*Pérez-Paricio, 2001*). En este contexto, la utilización de caudales para usos ambientales representa una nueva estrategia para el binomio oferta-demanda. De cualquier modo toda actuación de recarga artificial tiene un valor estratégico asociado.

Elaboración de un sistema de indicadores específico

Entre los indicadores de las condiciones de referencia se han elegido cuatro técnicas diferentes basadas en la toponimia, geomorfología, hidrología superficial y subterránea. Con estos indicadores se ha justificado cómo ha cambiado el paisaje inicial, de pastizales y cultivos de secano, hacia un entorno ocupado principalmente por pinares y frecuentes parcelas en regadío.

Como contribución al conocimiento del medio, se ha elaborado una cartografía de Unidades Ambientales, diferenciando las Unidades: regadíos, labor intensiva de secano, pastizal sin arbolado, humedales salinos, superficie arbolada con especies forestales (pinares) e improductivo.

El sistema de indicadores de seguimiento propuesto constituye una importante novedad y diferencia los impactos que concurren sobre el entorno pre, sin y postoperacional, quedando diseñado un sistema singular para el control de las actividades de restauración, cuya aplicación a lo largo del tiempo permitirá conocer si las actuaciones se están llevando a cabo de forma apropiada. El sistema de indicadores considera el efecto de sinergismos e impactos acumulativos mediante factores de ponderación que se aplican al sistema de rangos-pesos.

El dinamismo inherente a los indicadores y su tendencia a conseguir la sostenibilidad del sistema permite minimizar su carga de subjetividad. Lo más importante son los objetivos medioambientales que se persiguen, resultando cada indicador como una herramienta para la consecución de tal objetivo.

Los indicadores medioambientales diseñados permitirán vigilar la evolución del acuífero, el seguimiento de la recarga artificial y su influencia en los ecosistemas asociados de una manera cuantificable con criterios objetivos. No obstante, hay algunos indicadores que dejan cabida a la subjetividad, especialmente los relacionados con indicadores socioeconómicos y procedencia política.

El sistema de rangos requiere una readaptación continua a lo largo del tiempo, en base a la información específica deducida del estudio de la respuesta del sistema ante la recarga artificial.

Programa de Vigilancia Ambiental

La recopilación de diversas pautas para elaborar un *Programa de Vigilancia Ambiental* en las circunstancias del *Complejo* permite contar con un soporte para el diseño de *Programas de Vigilancia y Control, programas de Emergencia, códigos de*

buenas prácticas y Corolarios de normas técnicas prácticas que puedan ser aplicadas en escenarios análogos.

La profundidad de alerta más idónea, de acuerdo con la experiencia en la zona se puede fijar en torno a 1,5 m.

Criterios para el diseño de un Plan Estratégico para el desarrollo sostenible

Como actuación para el desarrollo sostenible cabe elaborar una *estrategia integral* que aborde, por lo menos, los siguientes aspectos:

- Iniciar los expedientes de catalogación de las zonas más significativas del Complejo de Coca-Olmedo, que en su mayoría se encuentran totalmente desprotegidas.
- Involucrar a los municipios en la recuperación de los humedales actualmente sometidos a un “*uso indebido*”, como vertederos, muladares, etc.
- Usar los instrumentos de ordenación territorial y socioeconómicos para compatibilizar la perspectiva económica del territorio (dominante) con la ecologista, otorgando a las zonas húmedas la valoración que merecen como activos medioambientales, conatos de biodiversidad e hidrogeodiversidad, cuya gestión adecuada representa una oportunidad de desarrollo que no debe ser una vez más desaprovechada.
- Fomento de la necesidad de una protección efectiva en la jurisprudencia, en la PAC y en todos los ámbitos de ordenación, incluyendo la educación ambiental.
- Empleo de aquella parte de las innovaciones tecnológicas futuras que contribuyen eficazmente a la gestión hídrica, tanto para aguas superficiales como subterráneas.
- Facilitar el acceso a la información (p.e., a través de Internet) y mejorar la educación e información hidrológica de los usuarios, facilitando así su participación (*Llamas, 2001*).
- La participación puede requerir incentivos como técnica operativa de probado éxito, por ejemplo, condicionando ciertas ventajas a la población involucrada, tales como la percepción de subvenciones si aplican con rigor un *Código de Buenas Prácticas Agrícolas* integral en el que estén incluidas las actuaciones regenerativas, fomentando así la aplicación de las medidas medioambientales previstas.

La declaración del Complejo de Coca-Olmedo del acuífero de Los Arenales como espacio natural protegido no parece factible en un futuro inmediato, si bien puede resultar viable la *incorporación al catálogo de zonas húmedas de interés especial* de algunos bodones significativos, actualmente muy degenerados y susceptibles de recuperación, como son los humedales azules, amarillos y naranjas de la nueva clasificación presentada. También es factible a corto plazo y escasos costes la preservación de las características de aquellos que ya gozan de esta figura, como son las lagunas de Caballo Alba, las Eras y la Iglesia. La inclusión de la totalidad de los humedales en el *catálogo* no parece factible, sin embargo, resulta conveniente lograr una protección de todo el *Complejo*, al haberse demostrado que los humedales gozan de conectividad y tienen una entidad medioambiental común.



COROLARIO

PROPOSICIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO-ACUÍFERO (SAT)

A partir de las experiencias citadas en los apartados previos resulta viable la elaboración de una serie de normas y criterios técnicos aplicables a escenarios análogos. A pesar de que gran parte de las experiencias sean puntuales, los conceptos de recarga artificial localizada y variabilidad espacial no deben suponer un problema si lo que se busca son estimaciones a escala regional.

De Vries & Simmers, 2002



ÍNDICE DEL BLOQUE 5

MEMORIA

ÍNDICE DEL BLOQUE 5	865
BLOQUE 5. ÍNDICE DE FIGURAS	865
BLOQUE 5. ÍNDICE DE TABLAS	866
BLOQUE 5.- COROLARIO. PROPOSICIÓN DE TÉCNICAS SAT	867
1. INTRODUCCIÓN	867
1.1. Objetivos	868
2. HILO CONDUCTOR	868
3. MÉTODOS Y MATERIALES	869
4. ESTADO DE LA CUESTIÓN. CONCEPTOS PREVIOS Y REGLAS DE USO COMÚN EN LAS OPERACIONES DE AR.....	870
4.1. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUANTITATIVOS	870
4.2. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUALITATIVOS	870
4.3. ACTUACIONES EN EL MEDIO RECEPTOR	872
5. IMPACTOS Y DISFUNCIONES DETECTADOS EN LA CUBETA DE SANTIUSTE TRAS DOS CILOS DE RECARGA ARTIFICIAL	876
5.1. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUANTITATIVOS	876
5.2. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUALITATIVOS	876
5.3. ACTUACIONES EN EL MEDIO RECEPTOR	879
6. ALTERNATIVAS APLICABLES EN CADA SITUACIÓN CONCRETA.....	884
6.1. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUANTITATIVOS	884
6.2. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUALITATIVOS	892
6.3. ACTUACIONES EN EL MEDIO RECEPTOR	894
6.4. CREACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO	911
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL BLOQUE 5	917

BLOQUE 5. ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 5.01. Esquema argumental del Bloque 5, llamado: “Corolario. Proposición de técnicas SAT para sistemas análogos.”	869
Fig. 5.02. Etapas de implantación de un sistema SAT morfológico en un dispositivo tipo balsa ara la AR superficial. En el primer estadio la balsa tiene fondo plano. En ella se practican furrows o acanaladuras, consiguiendo la deposición de finos en estas concavidades morfológicas del sustrato (Modificado de Peyton, 2002).	873
Fig. 5.03. Diseño esquemático del dispositivo BCV operativo en los campos de dunas de Ámsterdam. Se trata de un robot móvil para la extracción de finos diseñado por Storm van Leeuwen Inc, Winterswijk, Holanda. (Tomado de Van Duijvenbode & Olsthoorn, 1998).	874
Fig. 5.05. Presencia de procesos tipo cascading en las estructuras de parada del caz de AR.	878
Figs. 5.06. a) – c). Problemas que afectan al medio receptor inherentes al dispositivo de recarga. Desmoronamiento de las arenas de las paredes del caz como consecuencia de la pendiente (1), llegando a desviar su trazado (2); acumulación de plantas y residuos en los dispositivos de parada por transporte	



<i>eólico (3). El mantenimiento se perfila como la alternativa más apropiada, mediante operaciones de limpieza periódica del caz durante el periodo de recarga (4).....</i>	879
<i>Figs. 5.07. a) y b). El control sobre el nivel del agua de recarga dentro del dispositivo y de la profundidad de alerta constituyen elementos de gestión básicos. El control sobre las estructuras de parada y caudal entrante debe ser continuo, para evitar impactos tales como desbordamientos e inundaciones por el ascenso excesivo del nivel freático como consecuencia de la recarga artificial.</i>	880
<i>Fig. 5.09. El cauce fluvial debe contar con una estación de aforo adyacente a la derivación para el seguimiento de la evolución hidrológica del sistema. Estación SAICA en Villeguillo y estación Voltoya Coca, ambas de la CHD.....</i>	885
<i>Fig. 5.10. Pozo-sondeo telescópico en desuso situado cerca de la cabecera del caz de recarga. Este tipo de pozos son susceptibles de ser empleados para operaciones de recarga artificial tras rediseñar su estructura. Cubeta de Santiuste, mayo de 2002.</i>	887
<i>Fig. 5.11. Esquema constructivos de sistemas de recarga superficiales dependientes de la profundidad del agua para tres tipos de acuíferos diferentes: presencia de un nivel confinante en un acuífero multicapa con zanjas rellenas de grava (izquierda), pozo para la zona vadosa (centro) y pozo con un nivel freático colgado en un acuífero multicapa (derecha).(Modificado de Bouwer, 2002).....</i>	887
<i>Fig. 5.12. Dispositivo de infiltración a través de pozos de gran diámetro abandonados previamente acondicionados.....</i>	889
<i>Figs. 5.13. a) – c). Diseño de los dispositivos de corrección de la acidez en las aguas de recarga. El diseño del lecho filtrante puede cumplir además objetivos geotécnicos, como la estabilidad de los taludes (a). La ausencia de gaviones en ocasiones trae como consecuencia el derrumbe de estos muros (b) o el acarcavamiento (c).....</i>	894
<i>Fig. 5.15. Diseño de los dispositivos de filtración propuestos para ser intercalados en el circuito de las aguas de recarga.</i>	896
<i>Fig. 5.16. Los dispositivos de parada conllevan un incremento del oxígeno disuelto en las aguas por efecto “cascading.”.....</i>	897
<i>Fig. 5.17. Dispositivos de vasos comunicantes propuestos para evitar el efecto “cascading.”.....</i>	898
<i>Fig. 5.18. Dispositivo tipo zanja drenante para preservar las aguas de recarga de la luz solar y el efecto de la ETR.....</i>	899
<i>Fig. 5.19. Conceptualización del flujo de aguas y procesos asociados a la infiltración a través de una cuenca salina. Basado en Leaney & Christen, 2000.</i>	902
<i>Fig. 5.20. El uso de un circuito cíclico para las aguas, mediante el empleo de un conducto conectado con un pozo salino(a), e impulsado por una bomba peristáltica (b), permite la recirculación del agua. Esta opción se presenta como una alternativa viable y de bajo coste para la salinización inducida (Modificado de Lamontagne et al, 2002).</i>	903
<i>Figs. 5.21 a) y b). Dispositivo de infiltración mediante recarga artificial inducida en las inmediaciones de los humedales del Complejo de Coca-Olmedo.</i>	905
<i>Fig. 5.22. Evolución teórica del nivel freático durante la recarga estimulada. Descenso en cabecera, junto a la zona de infiltración o inyección, y ascenso en la zona topográficamente más deprimida o humedal [aguas abajo según el gradiente hidráulico.</i>	906
<i>Fig. 5.23. Diseño preliminar propuesto de un BCV específico para la zona de estudio.</i>	907
<i>Fig. 5.24. Aspecto de algunos sectores del caz encharcados y con implantación de vegetación durante la época estival. El control de las especies implantadas constituye una técnica positiva para preservar la tasa de infiltración en estos sectores del caz.....</i>	909
<i>Fig. 5.25. Proposición de técnicas SAT para la mejora de la efectividad de la recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Página siguiente).....</i>	914

BLOQUE 5. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 5.01. Standards de calidad establecidos por distintos autores para los principales parámetros del agua de recarga. Basado en y modificado de Pérez-Paricio, 2000a.</i>	872
<i>Tabla 5.02. Estándar de calidad para las aguas de recarga artificial en el caso concreto de la Cubeta de Santiuste y otros escenarios análogos. Datos basados en datos bibliográficos y en experiencias obtenidas en campo, laboratorio y gabinete. Propuestas de actuación genéricas para prevenir/curar las afecciones generadas.</i>	883
<i>Tabla 5.03. Estándar de calidad para las aguas de recarga artificial en el caso concreto de la Cubeta de Santiuste y otros escenarios análogos. Datos basados en datos bibliográficos y en experiencias propias obtenidas en campo, laboratorio y gabinete.</i>	893



BLOQUE 5.- COROLARIO. PROPOSICIÓN DE TÉCNICAS SAT¹

Naturaleza y biodiversidad: Proteger un recurso único

Los recursos del planeta, sobre todo recursos renovables como el suelo, el agua, el aire y la madera, soportan una fuerte presión de la sociedad humana. Se necesita una estrategia centrada en medidas tales como impuestos e incentivos, que garantice una explotación más sostenible de los recursos.

Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente: “*Medio ambiente 2010: El futuro está en nuestras manos.*”

1. INTRODUCCIÓN

En los apartados previos se ha llegado a un grado de conocimiento del acuífero y de las operaciones de recarga artificial (AR) llevadas a cabo en él.

En este contexto, las alternativas de actuación que se presentan para la mejora de la efectividad de las operaciones de AR son elevadas, y constituyen un amplio abanico de posibilidades cuya aplicación debe contar con un basamento técnico sólido y fiable.

Partiendo de las experiencias citadas en los apartados previos, no solo las obtenidas en la Cubeta de Santiuste, sino también en otros escenarios nacionales e internacionales, en este bloque se pretende elaborar una serie de normas y criterios técnicos de actuación en el acuífero objeto de estudio aplicables a escenarios análogos. Gran parte de ellos pueden ser clasificados como técnicas de tratamiento de suelo y acuífero o SAT (*Soil Aquifer Treatment*), mientras que otras son procedimentales. Ambas pueden inferir bien en el medio receptor (caracterización de ambientes), en los dispositivos de recarga (estructuras de obra) o en el agua a recargar (especialmente en cuanto a pretratamiento se refiere).

La determinación del punto óptimo o teórico cuantitativo de funcionamiento de las instalaciones de recarga puede ser tratado de manera distribuida y puntual para cada una de las Unidades Hidroambientales (UHAs).

Estas normas marcan unas pautas, eminentemente prácticas, que deben ser tenidas en cuenta antes de construir dispositivos para la recarga artificial superficial, con objeto de evitar la construcción de estructuras de recarga sin contar con estudios del medio físico adecuados.

¹ ¹Según se especificó en el bloque 1, las técnicas SAT o *Soil Aquifer Treatment* son aquellas que se aplican en el agua de recarga y/o medio receptor para aumentar la efectividad de las instalaciones de recarga artificial.

A pesar de que gran parte de las experiencias sean puntuales, los conceptos de recarga artificial localizada y variabilidad espacial no deben representar variaciones sustanciales para la escala de trabajo considerada (*De Vries & Simmers, 2002*).

El objetivo se prolonga además hacia etapas posteriores, en las que sea preciso llevar a cabo operaciones de limpieza y mantenimiento y un seguimiento de la evolución del acuífero y de la efectividad de las actuaciones, basado en el seguimiento de indicadores medioambientales de respuesta integrados en los programas específicos de vigilancia y control de la recarga de acuíferos.

1.1. Objetivos

El principal objetivo de este bloque es presentar una serie de aspectos procedimentales, en gran parte basados en experiencias de todo el mundo, y en especial de la cubeta de Santiuste, que permitan el diseño y gestión de dispositivos de la manera más efectiva posible.

Uno de los principales problemas que se han presentado es cómo conseguir una capacidad de infiltración eficaz y rápida en el caso de haber agua en suficiencia para recarga artificial en el sistema. El problema presenta un carácter técnico ¿cómo aumentar la velocidad de infiltración de agua en el acuífero?. Una posible solución a tal cuestión es la adopción de técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT) y otras técnicas complementarias.

Analizando los distintos impactos que han sido detectados en el sistema de recarga artificial durante dos ciclos de AR (efecto *Lisse*, oxigenación de las aguas de recarga, colmatación del dispositivos, etc.) se han extraído experiencias prácticas y diseñado prototipos basados en tres argumentos básicos: minimizar impactos ambientales, proponer mejoras para el dispositivo de AR actual y extraer normas prácticas extrapolables a sistemas análogos.

Algunas de las alternativas propuestas se basan en experiencias desarrolladas por distintos autores en los sistemas de AR del mundo, la mayoría de las cuales cuentan con reseñas escritas, mientras que otras han surgido de la experiencia de AR en la *Cubeta*.

2. HILO CONDUCTOR

Siguiendo el esquema de “hilo conductor” ya presentado en los bloques previos, este tema ha sido estructurado describiendo el estado de la cuestión, analizando las disfunciones del sistema de recarga artificial superficial y proponiendo alternativas basadas en “técnicas SAT” para su aplicación práctica.

Las actuaciones que pueden ser llevadas a cabo para el logro de esta finalidad han sido clasificadas por su tipología en tres grupos, que son: Las relativas al agua de recarga, las relativas al medio receptor (suelo y acuífero) y las relativas a la interacción de ambos.

Del estudio de estos componentes surgen una serie de criterios a tener en cuenta en el diseño de los dispositivos de recarga, construcción y mantenimiento, de manera que permitan una máxima efectividad. Posteriormente se contemplan otra serie de actuaciones que deben ser tenidas en cuenta en la elaboración de estudios y Evaluaciones de Impacto Ambiental en instalaciones de recarga artificial y en los Programas de Vigilancia y Control y/o códigos de Buenas Prácticas que generalmente son *ex situ*.

El “*hilo conductor*” se muestra en el esquema siguiente, con mención de los principales apartados no comunes con los bloques restantes (Fig. 5.01).

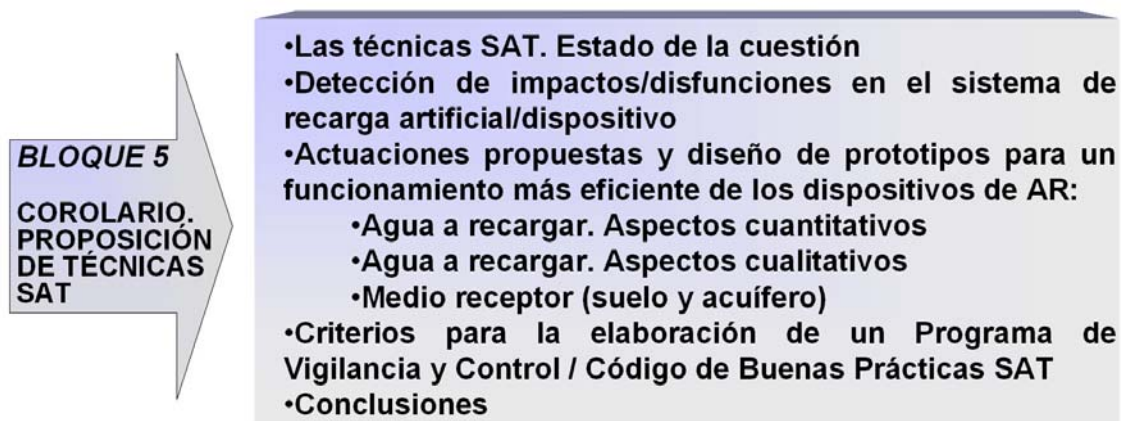


Fig. 5.01. Esquema argumental del Bloque 5, llamado: “Corolario. Proposición de técnicas SAT para sistemas análogos.”

3. MÉTODOS Y MATERIALES

La metodología que subyace al desarrollo de este Bloque se apoya en las siguientes técnicas:

- Procedimientos para la identificación de impactos ambientales (Bloque 4).
- Aplicación de la técnica de escenarios comparados. A partir del análisis de los resultados obtenidos y del seguimiento de otras actuaciones de recarga artificial con información accesible (tanto en el ámbito nacional como internacional), se va a elaborar un decálogo o corolario de normas técnicas operacionales para ser aplicadas en escenarios análogos.
- Seguimiento de las mejoras técnicas disponibles (MTD). Se han llevado a cabo consultas periódicas en Internet, para conocer experiencias y metodologías “nuevas.” Algunas de ellas han sido aplicadas sobre la marcha, especialmente técnicas SAT y de descolmatación de acuíferos.

Los materiales empleados para el desarrollo de esta tarea no son otros que, una extensa recopilación documental mediante consultas periódicas a Internet y a bibliotecas, y la experiencia obtenida en campo tras la fase de obra, puesta en marcha y funcionamiento del dispositivo de recarga descrito a lo largo de dos años de recarga artificial.

4. ESTADO DE LA CUESTIÓN. CONCEPTOS PREVIOS Y REGLAS DE USO COMÚN EN LAS OPERACIONES DE AR

De acuerdo con el esquema metodológico llevado a cabo en los apartados precedentes, se considera preciso y con las divisiones establecidas para la presentación de las técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT), se considera procedente comentar el “estado del arte” en la actualidad y definir una serie de conceptos y nociones en las que se apoyarán las normas técnicas ulteriores.

4.1. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUANTITATIVOS

Además de la disponibilidad de agua para la recarga artificial existe otro parámetro de gestión importante que es el “*safe yield*”. Se trata de una técnica en la que las extracciones del acuífero deben igualar la recarga total en el mismo (*Pérez-Paricio, 2001*). Esta técnica es de obligado cumplimiento en determinados lugares, como es el caso de Phoenix (USA), si bien minimiza la capacidad de regulación del acuífero a medio y largo plazo.

4.2. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUALITATIVOS

Entrando en las distintas líneas de investigación llevadas a cabo, algunos autores han centrado sus esfuerzos en el estudio de las actuaciones para la calidad y la contaminación previa de las aguas, especialmente en cuanto a la atenuación de materia orgánica disuelta. A este respecto cabe destacar los trabajos de *Leenheer, 2002; De los Cobos, 2002*, etc.

El pretratamiento del agua de recarga suele ser complicado y costoso. Son deseables tasas por debajo de 2 ó 3 mg/l de materia en suspensión, así como la eliminación de los nutrientes y materia orgánica del agua, para conseguir la mayor vida útil del pozo (*Bouwer, 2002 y MIMAM, 2002*).

Este objetivo se lleva a cabo de diversas maneras: La técnica de adición de desinfectantes o **DBPs** (*Disinfection by Products*) es empleada en experiencias de todo el mundo, si bien se han dado casos diversos positivos y negativos como resultado de la cloración (*Pyne, 1995 y 2002; Bouwer, 2002; Asano, 2002*), microfiltración (*Hutchinson & Woodside, 2002*); iodación (*Fox, 2002*), ozonificación y radiaciones ultravioleta (*Cushing et al, 2003*); aditivos para el control del pH (*Pyne, 1995; Stuyfzand & Mosch, 2002*); la combinación de distintas técnicas de forma simultánea (*Dillon & Pavelic, 1996*); control de la temperatura del agua (*Pérez-Paricio, 2001; Olsthoorn, 2002*), escasez de gases disueltos (*Bouwer, 2002*), etc.

Los principales parámetros a tener en cuenta y su límite cualitativo han sido el objetivo de numerosos trabajos de investigación. Por citar algunos, el Total de Sólidos en Suspensión (TSS) o **turbidez** ha sido establecido en 10 ppm a partir de ciertas experiencias de AR realizadas en California (*Aiken, 2002; Cozzarelli, 2002*), otras experiencias en Colorado han exigido una mayor severidad, reduciendo el estándar para las aguas de recarga de origen fluvial de 8 hasta 2,8 mg/l (*Mills, 2002*). Experiencias en

Texas han determinado que sea menor a 20 mg/l, con un *óptimo cualitativo* inferior a 10 mg/l (en *Fryar, 2001*). En dispositivos de inyección profunda una concentración de 2 mg/l puede ser suficiente para reducir de forma significativa el caudal de recarga en los pozos (*Pyne, 1995*).

El **Total de Sólidos Disueltos (TSD)** condiciona en gran medida la colmatación química y biológica (*bioclogging*). Los estándares encontrados en la bibliografía están fijados en 150 ppm para dispositivos superficiales (*Pyne, 1995; CSIRO, 2001*) y 100 ppm en dispositivos de recarga en profundidad (ASR) (*Dillon & Pavelic, 1996*).

El estándar de calidad para el **carbono orgánico total (TOC)** varía entre límites anchos en la legislación consultada. En California el límite deseable está fijado en 10 mg/l (*Mills, 2002*); otros estudios fijan el umbral entre 8 y 18 ppm (*Rinck-Pfeiffer, 2002*). En dispositivos de inyección profunda el intervalo oscila entre 3 y 12 ppm para Sur Australia (*Dillon & Pavelic, 1996*) y en California es de 1 mg/l (*Mills, 2002*).

El límite para el **Carbono Orgánico Disuelto. COD (=DOC)** en el estándar suizo es de 2 mg/l en sistemas de recarga mixtos (*Pérez-Paricio, 2000a*).

En general, resulta inviable establecer un **pH** recomendable para las aguas de recarga, ya que depende de cada medio receptor, si bien es recomendable que sea neutro o ligeramente básico. Algunos de los valores estándar encontrados en la literatura hidrogeológica están marcados en el intervalo de 7 a 7,5 (*Rinck-Pfeiffer, 2002*).

En las siguientes tablas se presentan los estándares de calidad para los parámetros más influyentes que han sido establecidos en distintos países, de acuerdo con los antecedentes consultados:

En la tabla de distinguen los distintos tipos de colmatación y los sistemas de recarga empleados, recopilando los valores recomendables en distintos países. La fuente de información queda citada al pie (Tabla 5.01).

CONCEPTO		VALOR UMBRAL	COMENTARIOS
COLMATACIÓN FÍSICA	Sistema Profundo	⁹ [TSS] < 2 mg/l ^{1,9} [TSS] < 0,1 mg/l ² MFI < 3-5 s/l ² ^{1,3} Turbidez < 1 NTU ¹¹ [TSS] < 3-4 mg/l	Si K > 40 m/día Si 4 m/día < K < 40 m/día
	Sistema superficial	^{1, 3, 9, 12, 13} [TSS] < 10 mg/l Turbidez < 5 NTU	
COLMATACIÓN BIOLÓGICA	Sistema Profundo	⁴ pH > 7,2 (Bacteria de hierro) ^{4, 11, 12, 13} Evitar CO ₂ ^{4,13} COD < 2 mg/l ⁴ Eh > 10 mV	Según normas suizas
	Sistema superficial	TOC < 10 mg/l	
COLMATACIÓN QUÍMICA		⁶ [Fe ²⁺] _{GW} < 0,2 mg/l ⁸ Índice Ryznar > 7	Más importante para la extracción que para la

		^{8, 11, 13} pH < 7,5 ⁸ Bajo [Ca ²⁺] y [Mg ²⁺] ⁸ TSD < 150 mg/l ⁸ [Cl] < 500 mg/l ¹¹ [Fe total] 0,02-0,1.	recarga de pozos. Los índices de saturación de minerales son esenciales.
CORROSIÓN		⁸ OD < 2 mg/l ⁸ Índice Ryznar < 9 ⁸ pH > 7 ⁸ CO ₂ < 0,50 mg/l ⁸ [TSS] < 1,000 mg/l ⁸ Evitar H ₂ S	Aplicable a pozos y tuberías.

Tabla 5.01. Standards de calidad establecidos por distintos autores para los principales parámetros del agua de recarga. Basado en y modificado de Pérez-Paricio, 2000a.

¹ Normas Holandesas (Peters, pers. comm.); ² Olsthoorn (1995); ³ Normas Alemanas (Schottler, pers. comm.); ⁴ Degalier (1987); ⁵ van der Kooij & Hijnen (1990); ⁶ Lucas et al, (1995); ⁷ Hills et al, (1989); ⁸ Ford (1990); ⁹ Pyne (1995); ¹⁰ Hurni; ¹¹ Rinck Pfeiffer (2002); ¹² Normas NWQG de Australia (*Nacional Water Quality Guidelines*), CSIRO, Moran et al, 2001; ¹³ *Standard Guidelines for artificial recharge (EWRI-ASCE, 2001 b)*.

4.3. ACTUACIONES EN EL MEDIO RECEPTOR

Además de la composición de las aguas es preciso conocer la del suelo y acuífero, para prever los resultados de la interacción entre las aguas de recarga y el medio receptor, y diseñar una actuación específica para cada caso (*Leenheer, 2002*).

Estas técnicas, integradas bajo la denominación genérica **SAT**, constituyen un conjunto de técnicas imprescindibles para el diseño correcto de un sistema integrado de descolmatación apropiado para cada sistema específico. En su aplicación se debe conceder una atención prioritaria al conocimiento de los procesos naturales que permiten extraer o minimizar ciertos contaminantes de las estructuras de recarga, especialmente compuestos orgánicos y nitrogenados (*Fox, 2002*).

Su desarrollo requiere diseños ingenieriles específicos y construcción y uso de sistemas de control multifactoriales en cada ciclo anual o plurianual (*Kopchynski, 1996*). Algunas de las técnicas SAT halladas en la bibliografía, que han sido aplicadas y probadas en distintos lugares del mundo. Entre éstas cabe destacar la implantación de sistemas duales en el espacio que permiten la utilización de una parte del dispositivo mientras la otra es sometida a procesos de limpieza y regeneración (*Fox, 2002*); el control de la distancia entre los pozos de inyección y de extracción (*Moorman et al, 2002*); ataque a la calcita mediante ácidos y control del pH del acuífero (*Rinck-Pfeiffer, 2002*); control de la concentración en DOC (carbono orgánico disuelto) y trihalometanos (*Rostad, 2002; Salameh et al, 2002*); acondicionamiento de la superficie del medio receptor mediante “*furrows*” o surcos en el fondo de las estructuras de recarga superficiales, como puede ser el caz, a la cota más baja. Estas acanaladuras son cubiertas con una membrana impermeable o geotextil específico. El resultado es que las paredes continúan escasamente colmatadas, mientras que la mayor parte de los procesos colmatantes son dirigidos y depositados en el fondo (surco) por efecto de la gravedad, las corrientes, el efecto del oleaje y la lluvia (*Peyton, 2002*) (Fig 5.02).

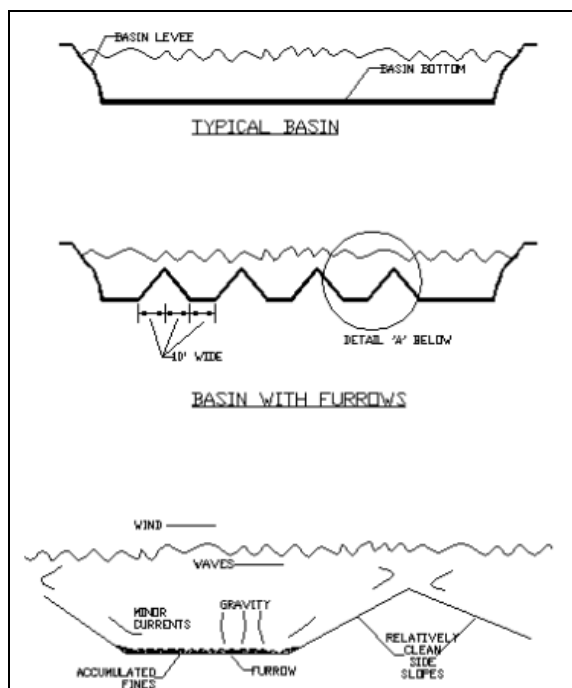


Fig. 5.02. Etapas de implantación de un sistema SAT morfológico en un dispositivo tipo balsa ara la AR superficial. En el primer estadio la balsa tiene fondo plano. En ella se practican furrows o acanaladuras, consiguiendo la deposición de finos en estas concavidades morfológicas del sustrato (Modificado de Peyton, 2002).

Las principales líneas de actuación se basan en el planteamiento de alternativas anticoltatación tendentes a reducir la colmatación física, biológica y química mediante actuaciones preventivas (Aiken, 1995 y 2002; Pérez-Paricio & Carrera, 1998b; Custodio y Llamas, 1983; Mills, 2002, etc.); o bien curativas. Algunas experiencias desarrolladas en la Unión India tendentes a evaluar la mejora producida por escarificación superficial en varias zonas de recarga, apuntan que la eliminación de la capa superficial sedimentada y los 15 cm de suelo infrayacentes llegan a aumentar la capacidad de infiltración entre un 16,6 % y un 75,6 % (Sayed-Farjad & Rezai, 1999).

Dentro de las técnicas “curativas” cabe destacar los dispositivos específicos para reducir la colmatación. Este tipo de vehículos, conocidos como “Basin Cleaning Vehicles” (BCV), presentan un diseño determinado en función de la zona a limpiar. Su funcionamiento es en continuo y su finalidad extraer los materiales que causan o contribuyen a formar procesos colmatantes.

En experiencias realizadas en Orange County (California), son extraídos los sedimentos del fondo de la estructura de AR a un dispositivo que produce la separación de las arenas por decantación, separando por gravedad también los compuestos orgánicos y coloidales, que son dirigidos a una línea de descarga. Esta línea generalmente lleva intercalados geotextiles, como puede ser una membrana que permita el paso del agua reteniendo su carga en suspensión (Mills, 2002; Hutchinson & Woodside, 2002).

El BCV debe ir dotado de un sistema de guía que permita ser utilizado sin operador, un sistema de jet y succión para la extracción de los sedimentos de la capa más superficial y el agua turbia. Para ello requiere un sistema destructivo del filtro de

cake superficial endurecido (*hardened filter cake*), que puede tener gran dureza (Mills, 2002).

Otro prototipo de BCV ha sido desarrollado en Ámsterdam. Su funcionamiento se basa en la extracción de sólidos en suspensión y partículas colmatantes por succión directa. En cuanto a su efecto, se ha comprobado que reduce el grado de colmatación genérico, así como la cantidad de hierro asociado a bacterias y de hierro ferroso combinado con cationes de magnesio en forma de hidróxidos.

La siguiente figura ilustra esquemáticamente el dispositivo BCV operativo en los campos de dunas de Ámsterdam (Fig. 5.03).

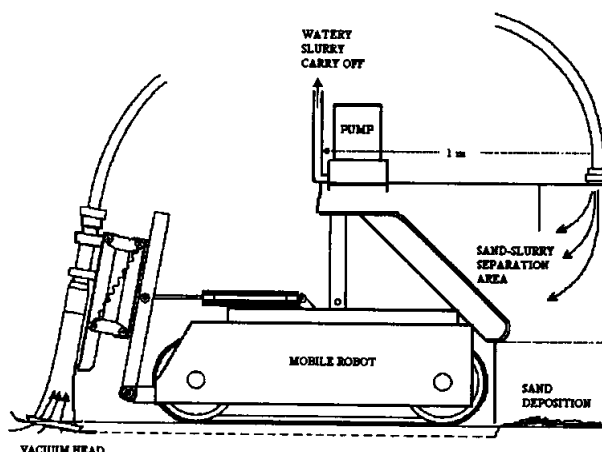


Fig. 5.03. Diseño esquemático del dispositivo BCV operativo en los campos de dunas de Ámsterdam. Se trata de un robot móvil para la extracción de finos diseñado por Storm van Leeuwen Inc, Winterswijk, Holanda. (Tomado de Van Duijvenbode & Olsthoorn, 1998).

Como **reglas de aplicación general** para todos los métodos y dispositivos de AR cabe destacar las siguientes:

- Tratamiento adecuado de las aguas de recarga y/o empleo de aguas de buena calidad para este fin (Pérez-Paricio, 2001).
- Minimizar la aireación de las aguas y el efecto *Lisse*.
- Recargar a velocidades lentas de las aguas, evitando el batido de las mismas, el *cascading*, etc. (Pérez-Paricio, 2000a).
- Minimizar la corrosión de las estructuras y oxigenación de las aguas, controlando las condiciones oxidantes, recargando con aguas a temperaturas mayores que las aguas del acuífero, etc.
- Control de ciertos parámetros evitando una concentración superior a la fijada en el estándar de calidad aplicable según la legislación del país donde se lleven a cabo las operaciones. En algunos parámetros hay *quórum* a nivel mundial, por ejemplo el agua de recarga deberá tener menos de 10 ppm de turbidez o sólidos en suspensión (TSS).
- Diseño adecuado de las estructuras con dispositivos de aviso y alarma al sobrepasar la profundidad de alerta (que en este tipo de acuíferos es de 2 metros según los trabajos de Christen et al, 2001, si bien en nuestra zona de estudio debe ser inferior y en torno a 1,5 m).

Y los siguientes **inconvenientes**:

- Los aportes extras de oxígeno, además de minimizar la tasa de infiltración, aceleran la precipitación de hierro, mientras que las pérdidas de CO₂ aceleran la precipitación de carbonatos en el medio receptor.

Algunas actuaciones son **cuestionables** según distintos autores y no generalizables para las distintas situaciones. Cabe destacar las siguientes (*Pérez-Paricio, 2000a y 2001; De Vries & Simmers, 2002*):

- Reducción de las colonias bacterianas mediante el uso de desinfectantes, nutrientes y minimización del TOC en el agua de recarga. Posibilidad de cloración de las aguas como técnica de pretratamiento.

- Reducción de algas mediante el empleo de productos químicos.

- Limpieza de la superficie de infiltración en el período estival acompañada de un tratamiento con ácidos.

- Adición de productos químicos para controlar el pH del medio (calcio), tratar las aguas de recarga (cloro, yodo), tratar el medio receptor sometido a procesos de colmatación física (polifosfatos, defloculantes), eliminación de costras calcáreas (ácidos) y de colmatación química (cloro, agua oxigenada para la inactivación de las bacterias), etc.

5. IMPACTOS Y DISFUNCIONES DETECTADOS EN LA CUBETA DE SANTIUSTE TRAS DOS CILOS DE RECARGA ARTIFICIAL

Tras dos ciclos de recarga artificial superficial en la Cubeta, se ha detectado que están operando varios impactos ambientales negativos en el dispositivo que pueden ser corregidos. Siguiendo el orden propuesto hasta ahora cabe destacar:

5.1. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUANTITATIVOS

En los dos ciclos de recarga artificial (AR) ha habido disponibilidad de agua suficiente, al haber sido dos años húmedos. El parámetro *Safe Yield* ha sido cumplido en la *Cubeta*, si bien es previsible que tras varios años de sequía la disponibilidad de recursos hídricos para la recarga artificial se vea mermado hasta el punto de tener que interrumpir las actividades.

Como consideraciones cuantitativas, es preciso controlar en continuo el caudal entrante al dispositivo de AR y el circulante por el río Voltoya. Al comienzo del segundo ciclo de recarga fue instalado un caudalímetro totalizador en la cabecera del dispositivo, si bien el río Voltoya carece todavía de una estación de aforo por encima de la derivación.

5.2. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUALITATIVOS

Los análisis de aguas en el agua de recarga han permitido apreciar que la mayoría de los parámetros controlados en el agua de recarga artificial se encuentran dentro de los estándares de calidad precisos, como son el TSS, TSD y COT. Ahora bien, estas concentraciones podrían haber sido sobrepasadas en casos puntuales, especialmente tras fuertes precipitaciones, sin que hayan sido detectadas al disponer de datos cualitativos escasos (un total de cinco determinaciones en dos años de AR).

La **turbidez** medida en las aguas de recarga oscila entre 5 y 8 ppm en las determinaciones efectuadas (de carácter puntual). Este hecho es debido a que el río Voltoya discurre sobre un sustrato granítico. Tan solo se han detectado valores por encima de 10 ppm en los días subsiguientes a fuertes precipitaciones, con movilización de sedimentos en cabecera. Las determinaciones realizadas en el río Eresma, en la estación SAICA A-70 (Villeguillo) tras la confluencia con el río Voltoya, desprenden unos valores de turbidez que oscilan entre 8,6 y 23 mg/l para el año 2003 (*datos facilitados por la CHD*), que indican que esta agua no son apropiadas para la AR.

A pesar de tan escasa turbidez, se han registrado procesos colmatantes en el fondo del dispositivo tras un ciclo de recarga artificial, por tanto, aunque el estándar de 10 ppm resulta apropiado para esta situación específica, sería recomendable llevar a cabo operaciones de pretratamiento de las aguas y controlar su gestión, cerrando si es preciso el dispositivo de entrada cuando las aguas del río sobrepasen este valor.

En vista de estos antecedentes y de mediciones efectuadas en el agua de recarga del río Voltoya, solo hay dos determinaciones puntuales de COD de 1,8 y 2,8 ppm, lo que puede resultar indicativo del rango de variabilidad. Además se ha detectado que se encontraba por encima de la concentración recomendable (2 mg/l) en algunos de los análisis realizados, lo que contribuye a la colmatación biológica o “bioclogging.”

La dificultad de obtener medidas de este parámetro conlleva la necesidad de adoptar otro criterio determinativo que constituya además de un estándar un indicador, como podría ser la DBO o la DQO. En el caso de la primera, los datos disponibles para el año 2003 en la estación SAICA A-70 del río Eresma oscilan entre 2,9 y 5,5; mientras la DQO tiene un rango de oscilación mayor, entre 3,8 y 18 (datos facilitados por la CHD).

El oxígeno y anhídrido carbónico disueltos [OD (=DO)] y [CO₂] en las aguas de recarga artificial provocan afecciones de distintas tipologías, representando un impacto medioambiental negativo en las operaciones de AR. Los estándares consultados en la bibliografía no contemplan por lo general valores de oxígeno disuelto. El valor umbral establecido es de 8 ppm.

Las medidas realizadas a lo largo del dispositivo de recarga manifiestan una concentración creciente de oxígeno a medida que avanza el agua a lo largo del dispositivo. De este modo en cabecera se han registrado valores entre 5,1 y 8,8 ppm, mientras que en la zona del Sanchón se han realizado determinaciones con resultados que sobrepasan los 10 ppm, llegando a alcanzar valores de hasta 12 ppm en el sector septentrional. Las medidas realizadas en los cauces fluviales oscilan entre 7,1 y 11,7 ppm para el año 2003 en la estación *Saica A-70* (CHD, 2003). Consecuentemente, el oxígeno y anhídrido carbónico disueltos (OD y [CO₂]) también sobrepasan con frecuencia el estándar de calidad. Este hecho está originado en gran medida por el diseño de los dispositivos, que provocan la agitación y batido de las aguas en contacto con la atmósfera, aumentando la concentración gaseosa en las aguas de recarga artificial. En las figuras 5.04 y 5.05 se aprecia la aireación por “batido de las aguas”, y el efecto “cascading” inherente al funcionamiento de algunos dispositivos.

La medición del almacenamiento en el acuífero ha permitido también detectar la aparición de un importante efecto Lisse, que ha llegado a alcanzar hasta el 30% de aire atrapado en el acuífero, según se ha calculado en el Bloque 2.

La temperatura del agua se encuentra entre los límites precisos, si bien se ha demostrado que durante los ciclos de helada disminuye considerablemente la velocidad de infiltración (Bloque 2). De este modo resulta preciso encontrar procedimientos apropiados para aumentar la efectividad de la recarga durante los ciclos de helada.

La sobresaturación de las aguas de recarga en sílice y calcita también sobrepasa la concentración recomendable. Se ha detectado un sector del acuífero sometidos a operaciones de recarga artificial cuyo ambiente hidroquímico de las aguas subterráneas es claramente reductor. Este sector, correspondiente al sector central del acuífero de la *Cubeta*, presenta además fuertes concentraciones en hierro libre, manganeso y sílice, de modo que las condiciones para la precipitación de hierro y calcita son propicias. Por tanto, es preciso llevar a cabo actuaciones para contrarrestar la calidad hidroquímica de las aguas de recarga artificial a su paso por este sector.



Fig. 5.04. Presencia de procesos tipo cascading en la cabecera del dispositivo.



Fig. 5.05. Presencia de procesos tipo cascading en las estructuras de parada del caz de AR..

5.3. ACTUACIONES EN EL MEDIO RECEPTOR

Se han encontrado impactos ambientales que afectan al medio receptor y a los dispositivos que requieren una intervención inmediata con objeto de incrementar la efectividad de las instalaciones. Entre estos cabe destacar la colmatación de dispositivos como consecuencia de un diseño inapropiado; afecciones en los taludes del dispositivo, con frecuentes desprendimientos de arena al caz de recarga artificial (Fig. 5.06 a); problemas de mantenimiento (Figs. 5.06 b y c), helada del terreno (Fig. 5.07 a), etc.

Otro tipo de actuaciones “a caballo” entre los dispositivos de recarga y en el medio receptor son los de vigilancia y control o gestión, como por ejemplo son los de seguimiento de la “profundidad de alerta” con generación de domos en la superficie piezométrica que pueden representar impactos ambientales significativos (inundaciones de cultivos (Fig. 5.07 b), etc.



Figs. 5.06. a) – c). Problemas que afectan al medio receptor inherentes al dispositivo de recarga. Desmoronamiento de las arenas de las paredes del caz como consecuencia de la pendiente (1), llegando a desviar su trazado (2); acumulación de plantas y residuos en los dispositivos de parada por transporte eólico (3). El mantenimiento se perfila como la alternativa más apropiada, mediante operaciones de limpieza periódica del caz durante el período de recarga (4).



Figs. 5.07. a) y b). El control sobre el nivel del agua de recarga dentro del dispositivo y de la profundidad de alerta constituyen elementos de gestión básicos. El control sobre las estructuras de parada y caudal entrante debe ser continuo, para evitar impactos tales como desbordamientos e inundaciones por el ascenso excesivo del nivel freático como consecuencia de la recarga artificial.

A modo de síntesis, en la siguiente Tabla se presenta el baremo del estándar de calidad propuesto frente a las determinaciones realizadas durante los dos ciclos de recarga artificial en la *Cubeta*, así como algunas recomendaciones operacionales preventivas y correctoras de carácter genérico para este sistema de recarga artificial superficial y otros en los que pueda ser aplicable por analogías (Tabla 5.02). En el apartado siguiente se proponen actuaciones específicas.

DETERMINACIONES	ESTÁNDAR CALIDAD	DE	ALGUNAS TÉCNICAS/OPERACIONES PREVENTIVAS/CORRECTORAS
TSS 5-8 ppm TSD 101,8 ppm	TSS < 10 ppm TSD < 150 ppm		Pretratamiento aguas de recarga. Filtración por sistemas mecánicos. Decantación. Trampas de escorrentía, plazoletas de decantación y estructuras de remanso. Diseño adecuado de los taludes del dispositivo arenoso y preservación (mampostería, gaviones, etc.).
COT < 5,5 mg/l COD 1,8-2,8 mg/l	COT < 10 mg/l COD < 2 mg/l		Selección de un contexto hidrogeológico apropiado con escasa influencia de vectores contaminantes. Pretratamiento. DBPs (<i>Disinfection by Products</i>): Cloración/iodación/ozonización/adición de agua oxigenada, rayos UV, etc. Limpieza vegetación durante AR. Empleo BCVs. Intercalación de membranas o líneas de fangos de filtrado y decantación. Evitar la paralización de las aguas en las balsas. Secado de algas mediante sistemas duales.
OD 5,1-8,8-11 mg/l [CO ₂] = 0,5 – 0,9 mg/l	OD < 8 mg/l [CO ₂] < 0,50 mg/l		Aislamiento luz solar y contacto con la atmósfera. Infiltración en zonas boscosas para que la vegetación consuma parte del CO ₂ del medio. Dispositivos tipo “vaso comunicante.” Evitar agitación y efecto <i>cascading</i> . Introducción peces específicos (medakas). Estructuras exentas en balsas para disminuir el agitación por oleaje. Desaireación mediante piezómetros intercalados entre los dispositivos de AR y extracción.

pH = 8	pH < 7,5-8	Implantar dispositivos anticorrosión en elementos metálicos y entubaciones
C = 191 μ S/cm	C < 200 μ S/cm	Lechos filtrantes. Corrección con aditivos químicos (ácidos/hidróxido sódico) evitando la formación de precipitados.
T ^a agua = 5,9 °C T ^a suelo = 6,1 °C	T ^a agua \approx T ^a suelo T ^a agua > T ^a acuífero	Criterios selectivos origen aguas de recarga. Almacenamiento provisional en depósitos o reservorios superficiales. Control velocidad circulación aguas recarga. Evitar operaciones durante <i>ciclos de helada</i> . Empleo de cámaras termostáticas.
Alcalinidad= 64 mg/l CO ₃ Ca	Alcalinidad <200 mg/l CO ₃ Ca	Adición químicos. Evitar efecto reciclaje por riego desde sondeos profundos.
[NO ₃]= 2 mg/l	[NO ₃] < 10 mg/l	Criterios selectivos. Desnitrificación. Técnica “ <i>anammox</i> ”, para la oxidación aeróbica del amonio Regadío seleccionando profundidad emplazamiento bomba.
Sobresaturación SiO ₂ = 35 mg/l. Sobresaturación Ca Mg (CO ₃) ₂ = 37,86 mg/l.	Sobresaturación \approx 0 Sobresaturación \approx 0	Lechos correctores. Empleo de quelantes, polifosfatos, defloculantes, etc. Criterios selectivos. Sistemas mecánicos y químicos (eliminación de costras calcáreas mediante ácidos). Aumentar la distancia entre los pozos de inyección y de extracción.
Salinidad		Evitar la salinización natural mediante recarga selectiva. Intercalar barreras para reducir la recarga natural en zonas de elevada salinidad.
H ₂ S \approx 0	Evitar H ₂ S	
MFI: 25 - 30 s/l ²	MFI < 3-5 s/l ²	Limpieza y mantenimiento. Empleo BCVs. Intercalación de filtros, rejillas y empaques de grava.

Bacterias y virus	Bacterias y virus	<p>Secado natural del lecho. Dispositivos duales. Escarificación de la parte colmatada. Agrietamiento por secado natural fondo. Criotratamiento. Extracción, lavado y reintegración del material o bien extracción del cake a vertedero periódicamente e implantación de nuevo terreno natural. Empleo geotextiles. Diseño en <i>furrows</i> o acanaladuras. Plantación de especies específicas en período estival. Reducir la compactación del sustrato, limitando la altura de la lámina de agua. La idónea oscila entre 0,5 y 1,4 m según autores.</p>
-------------------	-------------------	---

Tabla 5.02. Estándar de calidad para las aguas de recarga artificial en el caso concreto de la Cubeta de Santiuste y otros escenarios análogos. Datos basados en datos bibliográficos y en experiencias obtenidas en campo, laboratorio y gabinete. Propuestas de actuación genéricas para prevenir/curar las afecciones generadas.

6. ALTERNATIVAS APLICABLES EN CADA SITUACIÓN CONCRETA

A lo largo del bloque se han descrito y analizado distintas tipologías de impactos negativos y problemas encontrados en los dispositivos y experiencias de AR.

Con toda la experiencia obtenida de tal análisis, y el grado de conocimiento alcanzado en los bloques precedentes, se han establecido varios binomios problema-solución para aplicar en función de las circunstancias en las operaciones de recarga artificial (AR), basados especialmente en el empleo de técnicas SAT.

El tratamiento del tema se ha llevado a cabo desglosando las actuaciones sobre el agua de recarga artificial desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo y en el medio receptor (suelo y acuífero). Se han incorporado además el diseño de prototipos y dispositivos con carácter genérico preventivos, curativos y compensatorios.

Tanto el contenido del Bloque como los resultados obtenidos tienen una componente puramente práctica y aplicada, si bien los prototipos requieren un grado de desarrollo de ingeniería posterior que permitan llevar a la práctica los diseños, cumpliendo con los criterios objetivo, que básicamente son: minimizar las pérdidas (evapotranspiración, colmatación, etc.), facilitar las labores de descolmatación, reducir los costes en el transporte, almacenamiento y bombeo, permitir funcionar en *óptimo* (punto óptimo de recarga o tasa de infiltración más efectiva) incluso en situaciones climatológicas adversas (congelación del suelo o avenidas) y que tengan una vida útil suficientemente alta para obtener una alta rentabilidad.

6.1. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUANTITATIVOS

Cualquier operación de AR requiere unos excedentes hídricos para su introducción en el acuífero. En general los excedentes se presentan escasamente distribuidos en el tiempo, concentrándose en períodos en los que la capacidad de infiltración del terreno está mermada con respecto a períodos más secos. En determinados tipos de clima las precipitaciones pueden distribuirse en el tiempo de manera impactante para los dispositivos de recarga, máxime si se producen fuertes precipitaciones seguidas de períodos sin lluvia.

Independientemente del clima existen unos criterios comunes, deducidos de experiencias en todo el mundo, para el tratamiento de las aguas de AR desde un punto de vista cuantitativo, como son:

- Necesidad de contar con estructuras específicas en la superficie del medio receptor que permitan minimizar la evapotranspiración y colmatación, además de llevar a cabo labores de descolmatación de los poros. Así mismo, que se ajusten a las necesidades de la zona: escasa disponibilidad de terreno, presencia generalizada de cultivos, dificultades orográficas, climatología extrema (congelación del suelo) etc.
- Ubicación de las estructuras de acuerdo con las características del terreno, posición del nivel freático, espesor del acuífero, cercanía a la fuente de agua originaria, etc.





Figs. 5.08 a) – c). La cabecera del dispositivo debe ir dotada de un caudalímetro totalizador, preferentemente con medida en continuo, intercalado en la tubería de recarga antes del dispositivo de entrada. Su protección es llevada a cabo mediante una garita de hormigón y su alimentación mediante paneles fotovoltaicos. Es recomendable su medición en continuo y televolcado de datos.



Fig. 5.09. El cauce fluvial debe contar con una estación de aforo adyacente a la derivación para el seguimiento de la evolución hidrológica del sistema. Estación SAICA en Villeguillo y estación Voltoya Coca, ambas de la CHD.

- Conveniencia de diseñar un sistema de “*protocolos de recarga*” basados en experiencias previas y que tengan en cuenta los procesos operativos en cada momento (aireación, congelación, etc.).
- Control de caudales entrantes en el dispositivo de recarga artificial (Figs. 5.08 a-c) y de los circulantes en el río de toma en las inmediaciones del punto de derivación (Fig. 5.09).
- Estudio detallado de la topografía y microtopografía sobre la base de determinar zonas de alto riesgo de inundación durante la recarga.
- Posibilidades de captación de escorrentías superficiales que no malogren las instalaciones y que se aprovechen para la recarga, como podría ser el paso bajo la vía del tren de alta velocidad en nuestro “laboratorio experimental.”
- El desvío de excedentes hídricos hacia pozos de gran diámetro previamente acondicionados o a sondeos de inyección, con objeto de evitar inundaciones en situaciones de fuertes precipitaciones, etc.
- Alternativas de actuación conjunta o coordinada o complementación con recarga profunda a la superficial. Esta alternativa se presenta como esperanzadora para períodos de ciclos de heladas con menor capacidad de infiltración.
- Posibilidad de emplear la técnica de almacenamiento y recuperación en el acuífero o *Aquifer Storage Recovery (ASR)* en la zona (recarga muy profunda), para disponer de un volumen de agua que permita minimizar el impacto ambiental que puede producir un período de sequía plurianual. Otras opciones tendentes al mismo fin son la inyección profunda, construcción de aljibes subterráneos, perforación de una batería de sondeos profundos conectada a la red de distribución, trasvases, etc.

- **Infiltración por pozos abandonados**

La recarga artificial a través de pozos secos o perforados en la zona vadosa se perfila como una opción viable y barata, dada la abundancia de pozos de gran diámetro en la *Cubeta* que se encuentran abandonados y/o secos en la actualidad, por haber quedado descolgado el fondo con respecto al descenso progresivo del nivel freático. Algunos de estos pozos han sido rellenados de arena por sus propietarios, desapareciendo. Otros, todavía presentes en su diseño originario o dotados de una perforación complementaria en el fondo (pozo-sondeo o pozo telescópico, como el de la figura 5.10) pueden ser de gran utilidad para recargar con excedentes hídricos, especialmente en la época lluviosa.

El diseño de los dispositivos y su manejo depende en gran medida de las condiciones específicas del suelo, sus características y funcionamiento hidrogeológico, la climatología y la calidad del agua de recarga. Para ello es conveniente seguir la “regla de oro” en recarga artificial de acuíferos de Bouwer, 2002: empezar con cautela, aprender sobre la marcha y expandir las estructuras de acuerdo con lo aprendido de acuerdo con las necesidades.



Fig. 5.10. Pozo-sondeo telescópico en desuso situado cerca de la cabecera del caz de recarga. Este tipo de pozos son susceptibles de ser empleados para operaciones de recarga artificial tras rediseñar su estructura. Cubeta de Santiuste, mayo de 2002.

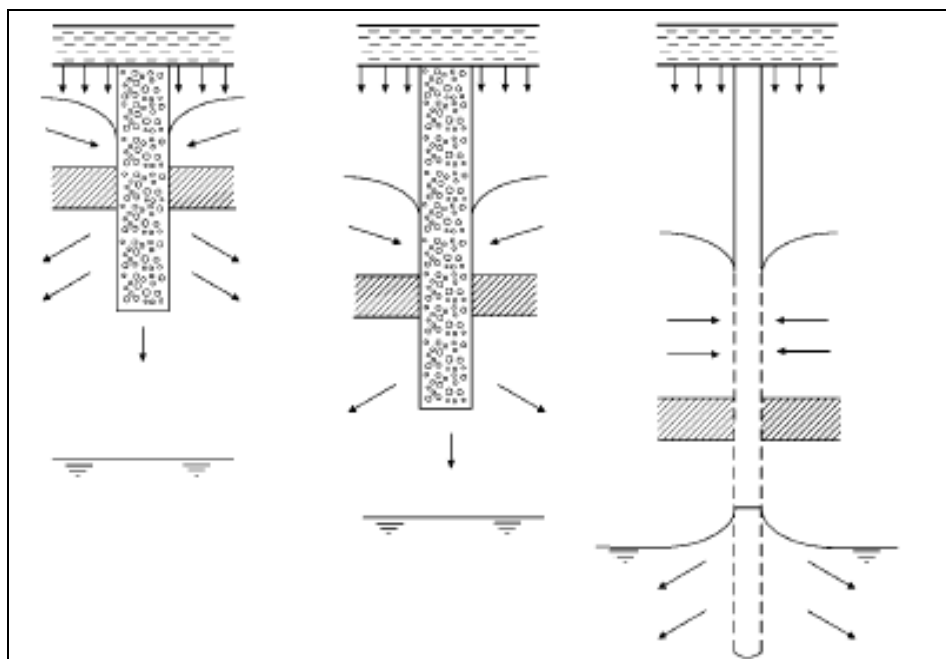


Fig. 5.11. Esquema constructivos de sistemas de recarga superficiales dependientes de la profundidad del agua para tres tipos de acuíferos diferentes: presencia de un nivel confinante en un acuífero multicapa con zanjas rellenas de grava (izquierda), pozo para la zona vadosa (centro) y pozo con un nivel freático colgado en un acuífero multicapa (derecha). (Modificado de Bouwer, 2002)

Este tipo de estructuras permite la recarga artificial superficial en situaciones parecidas en las que haya una escasa disponibilidad de terreno o gran carestía del mismo, cultivos, dificultades orográficas, climatología extrema (congelación del suelo) etc.

El agua de recarga debe ser pretratada, de modo que sea lo más limpia posible. Esta alternativa puede ir acompañada de un filtro de arena y un geotextil.

Estas aguas son dirigidas al acuífero a través de los numerosos pozos de gran diámetro distribuidos por la zona de estudio, muchos de los cuales se encuentran en desuso, si bien es preciso un acondicionamiento previo del dispositivo, de manera que esté enrejillado en su totalidad, el pozo debe contar con un empaque de gravilla o arena gruesa lavada y un tratamiento previo de las aguas de escorrentía mediante filtros y sistemas de decantación.

El agua de infiltración se aplica a través de una tubería de rejilla emplazada en el centro. La caída libre de agua debe ser evitada con objeto de minimizar la disolución de aire en el agua de recarga, reduciendo la formación de burbujas de aire y la disolución de oxígeno y CO₂, impidiendo así la oxigenación y batido de las aguas para evitar los efectos *cascading* y *Lisse*. Para ello es conducida con una tubería de menor diámetro y una válvula antirretorno que impida la caída libre.

La parte superficial funciona como un sistema de drenaje de agua “colgada”, mientras que la inferior funciona como el sistema de infiltración y recarga del acuífero. Dependiendo de la profundidad de las zanjas, la totalidad del caudal de recarga puede quedar “colgada” en la zona vadosa.

Los pozos deben ir acompañados de dispositivos complementarios que minimicen la peligrosidad y riesgo de inundaciones, como podría ser la instalación de guarda niveles en los pozos de recarga en ramales derivados escasos metros del caz, en piezómetros seleccionados para tal fin (especialmente en zonas donde se generan domos en la superficie piezométrica) etc. Estos deberían estar conectados preferiblemente a un sistema de telecontrol con volcado de datos a tiempo real (GSM o similar), que disparen la alarma cuando el nivel freático alcance la profundidad de alerta fijada para cada punto, que ha sido adoptada en 1,5 metros para la zona de estudio.

El dispositivo propuesto se presenta en la figura 5.12.

La captación debe ser realizada mediante dispositivos tipo aljibe o superficies improductivas tipo carreteras, etc. Una estructura idónea para tal fin es el drenaje de la vía del tren de alta velocidad, que recoge y desagua un importante volumen de aguas de escorrentía a un aliviadero artificial. No obstante, la elevada densidad de pozos abandonados en la zona de estudio permitiría instalar abundantes dispositivos de AR de este tipo.

Otros factores a tener en cuenta son la estimación del número de pozos necesarios, de su vida útil, costes de mantenimiento y costes del pretratamiento del agua.

Su vida útil previsiblemente será suficientemente alta para obtener una alta rentabilidad, dado que la actuación tiene bajos costes.

Los pozos colmatados pueden ser abandonados definitivamente o durante un período de “descanso”, máxime en el caso de que los procesos colmatantes sean mayoritariamente orgánicos.



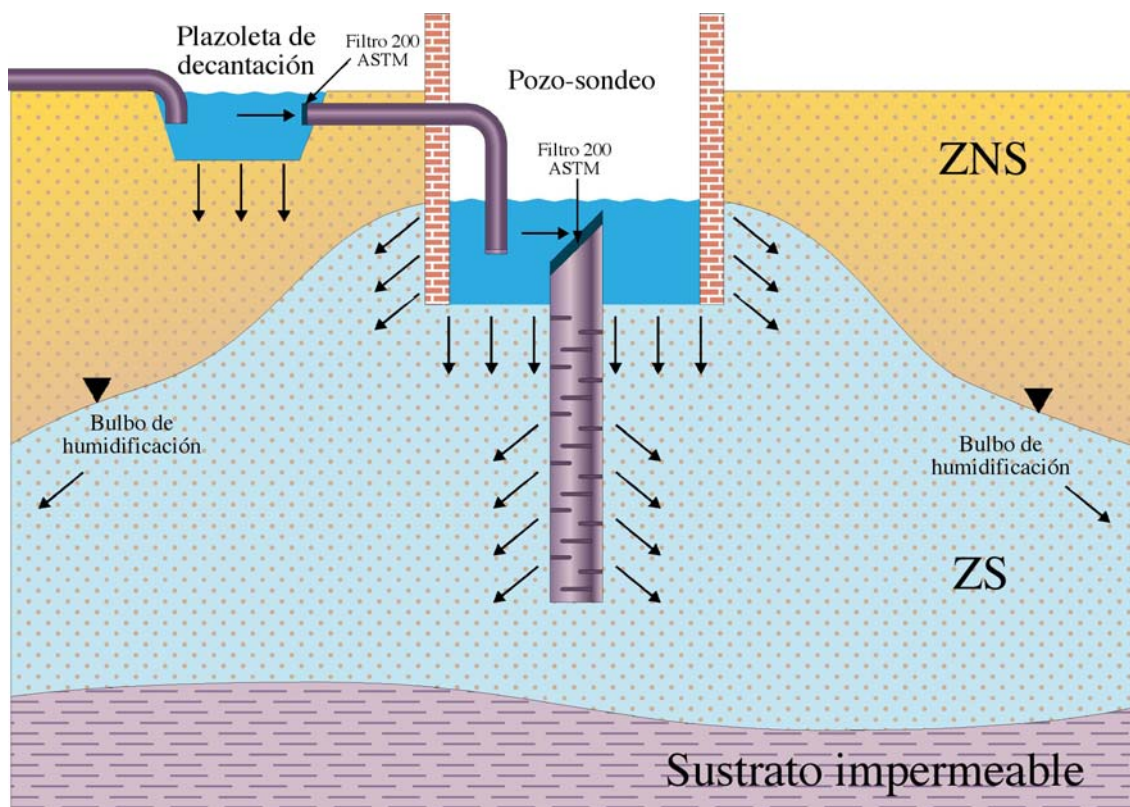


Fig. 5.12. Dispositivo de infiltración a través de pozos de gran diámetro abandonados previamente acondicionados.

La principal ventaja es la viabilidad y bajos costes de ejecución. La desventaja es la colmatación y que el hecho de estar emplazados en la zona vadosa impide su bombeo inverso para limpieza (*wash out*).

Otra posibilidad es el almacenamiento de agua en reservorios superficiales, sometiéndola a una presedimentación, si bien no cabe esperar grandes capacidades de infiltración en estos reservorios, además de precisar importantes superficies.

- **Recarga selectiva**

Conocidos los principales procesos y ambientes hidroquímicos en cada sector del acuífero, la recarga selectiva consistirá en favorecer aguas de composición conocida, si es preciso tratadas, en zonas cuya caracterización así lo requiera con un objetivo determinado. De este modo es posible minimizar la concentración de materia orgánica infiltrando aguas cloradas, yodadas u oxidantes por la adición de permanganato u ozono. También es posible la inyección de aguas reductoras en ambientes fuertemente oxidantes, que contribuyen a la génesis de nitratos a partir del amonio, como ocurre en la zona de cabecera del dispositivo; o el control de ambientes reductores para evitar la precipitación de calcita y compuestos ferruginosos, como es el caso del sector central de la *Cubeta*.

Los problemas generados son los siguientes:

- Aumento temporal de la concentración de vectores biológicos.
- Aumento temporal de la concentración de nitratos.
- Oxidación y movilización de metales pesados, convertidos en sales a partir de óxidos.
- Precipitación de costras, en general calcáreas, en la zona de interfaz.

- **Estudio de la viabilidad e idoneidad de la inyección profunda**

Los sistemas de recarga en profundidad están diseñados para introducir el agua en el acuífero mediante una serie de pozos o sondeos. Se emplea fundamentalmente en terrenos constituidos por una alternancia de niveles permeables (acuíferos multicapa). Se trata de una alternativa recomendable cuando hay escasez de superficie de infiltración, el nivel del agua se encuentra a gran profundidad o el acuífero es confinado.

Nuestra zona de estudio consta de dos acuíferos principales separadas por un acuitardo, de modo que los sondeos penetrativos producen un descuelgue desde el acuífero superficial (con un nivel freático cercano a 5 m de media) hacia el profundo (cuyo nivel oscila en torno a 48 m de profundidad). El aprovechamiento del descuelgue de aguas por el interior de las captaciones no cementadas y ranuradas permite intercomunicar niveles acuíferos diferenciados en la vertical (acuíferos multicapa) y el descuelgue del agua hacia compartimentos inferiores del acuífero. Se trata por tanto de una técnica para recarga profunda focalizada o inducida.

El método conlleva un deterioro cualitativo de las aguas de recarga para la mayoría de los usos, si bien puede ser una técnica idónea en casos concretos de recarga focalizada, creación de estructuras de desaireación del acuífero, etc.

Los pozos de recarga colmatados puede ser rehabilitados con técnicas de regeneración convencionales, si bien es preferible las labores preventivas, sometiendo el pozo a bombeos frecuentes (*backwashing*). En principio podría ser suficiente el bombeo inverso mediante la automatización de 3 períodos de bombeo de 15 minutos de duración por día.

En la zona de estudio hay registradas seis captaciones en las que se produce este efecto (Bloque 2, apartado 8.3.3.). La propuesta se basa en fomentar la recarga artificial en su zona de alimentación para aumentar así el caudal de transferencia del acuífero superficial al profundo.

- **Posibilidad de emplear la técnica del Aquifer Storage Recovery (ASR)**

El ASR es una tecnología para el almacenamiento de grandes volúmenes de agua subterránea a través de sondeos cuando hay disponibilidad de la misma, y su recuperación a través de los mismos sondeos cuando sea preciso (*Pyne, 1995*). La descripción y alcance de la técnica se presenta en el Bloque 1, apartado 3.1.2.7.

Al permitir el almacenamiento de aguas en épocas con excedentes hídricos y agua de calidad y su recuperación en períodos secos o de pobre calidad, constituye una técnica apropiada para mitigar el impacto ambiental originado por la carencia de agua



de riego en períodos de sequía, en los cuales es previsible que los dispositivos de recarga artificial superficial queden “parados”.

Esta tecnología debe emplearse para complementar las operaciones de AR superficial, creando sistemas mixtos.

Las experiencias obtenidas tras varios años de operatividad en distintas experiencias distribuidas por todo el mundo son consideradas, en general, positivas (*Martin & Dillon, 2002*), y económicamente satisfactorias (*Dillon, 1996*).

- **Limpieza y mantenimiento específicas para pozos de inyección**

Como tareas de **limpieza y mantenimiento** específicas para **pozos de inyección**, bien sea profunda o no, cabe destacar el **bombeo inverso** como técnica de mantenimiento (wash out-wash in) para la eliminación de finos. Esta técnica se perfila como una alternativa viable y eficaz en nuestra zona de estudio, dado que los pozos de recarga se configuran como una alternativa efectiva para conseguir una alta tasa de recarga en períodos con descensos térmicos bajo cero, y la posibilidad de emplear el acuífero profundo, dado que la capacidad de almacenamiento del superficial es insuficiente para cubrir un ciclo de sequía ordinario en este tipo de clima.

Además hay que añadir las técnicas de **regeneración** clásicas de pozos de recarga, tanto mecánicas (cepillado y arañado de paredes y fondo), como químicas (empleo de aditivos químicos). De acuerdo con las experiencias realizadas en pozos, los resultados mejores se han logrado mediante la combinación de ambas técnicas.

Con objeto a aumentar la tasa de infiltración y facilitar las operaciones de limpieza y mantenimiento, las estructuras de obra y dispositivos deben contar con un diseño inicial que facilite las actuaciones.

Sintetizando, algunas de las operaciones preventivas o correctoras son:

- Pretratamiento del agua de recarga.
- Secado natural del lecho y agrietamiento.
- Criotratamiento.
- Empleo de sistemas duales que permitan la limpieza de uno mientras el otro está operativo.
- Empleo de técnicas de limpieza tipo jet.
- Bombeo inverso en pozos cercanos al caz.
- Alternancia de bombeo normal e inverso (*Wash in- Wash out*).
- Lavado inverso (*backwashing*) en geotextiles, membranas y filtros.
- Técnicas de regeneración en pozos de recarga mecánicas (cepillado y arañado de paredes y fondo) y químicas (empleo de aditivos químicos).
- Técnicas de limpieza con la mayor cadencia posible.
- Bombeos diarios del pozo de inyección.

6.2. AGUA A RECARGAR. ASPECTOS CUALITATIVOS

El estudio cualitativo de las aguas de recarga y de los ambientes hidroquímicos del medio receptor han permitido diseñar algunas recomendaciones prácticas y proponer unos estándares de calidad para las aguas de recarga artificial.

A pesar de la escasa turbidez registrada en las aguas de recarga artificial (AR), se han detectado procesos colmatantes en el fondo del dispositivo tras un ciclo de recarga artificial, que han llegado a manifestarse como películas de arcilla de hasta un centímetro de espesor en el fondo del caz. Por tanto, aunque el estándar de 10 ppm resulta apropiado para esta situación específica, sería recomendable llevar a cabo operaciones de pretratamiento de las aguas, y controlar su gestión, cerrando si es preciso el dispositivo de entrada cuando las aguas del río sobrepasen este valor. De cualquier modo es preciso llevar a cabo operaciones de mantenimiento.

En cuanto al COD, a tenor de los resultados de la analítica, parece previsible encontrar problemas de colmatación biológica en las condiciones en que se está llevando la recarga en la actualidad. Se han detectado bacterias, algas, etc. En las aguas de recarga, si bien, no se han llevado a cabo análisis biológicos.

El oxígeno disuelto resulta un parámetro difícil de controlar en dispositivos de recarga artificial superficial. En nuestro caso específico, sería procedente llevar a cabo medidas preventivas, evitando el agitación del agua y su contacto con la atmósfera; y curativas, enterrando algunos tramos del dispositivo de recarga, mejorando los dispositivos para disminuir la disolución de oxígeno de la atmósfera por *cascading*, etc.

La transformación de dióxido de carbono disuelto en ácido carbónico ocurre a una velocidad relativamente baja y en condiciones ácidas (pH en torno a 4,5). El ácido carbónico pierde un ión oxonio en condiciones de pH ambiental de aproximadamente 6. El ión bicarbonato, la forma de carbono más abundante en las aguas subterráneas, pierde un nuevo hidronio a un pH de aproximadamente 8, coexistiendo con la forma reducida carbonato en condiciones de pH próximo a 10. De este modo las aguas alcalinas llegan a presentar valores de pH de hasta 11. Los cationes sodio y calcio son los más estables a pH superior a 8,2, siendo el sodio el más y abundante a pHs superiores a 8,5.

El control sobre el pH mediante técnicas SAT a lo largo del dispositivo se perfila como la opción más recomendable para conseguir minimizar la precipitación de carbonatos, formación de encostramientos o, simplemente, mejorar la calidad de las aguas subterráneas. Esta corrección debe llevarse a cabo tras caracterizar y conocer las variaciones del pH del medio y las reacciones predominantes en cada sector.

En caso de detectar importantes procesos biológicos o contaminantes, puede ser preciso llevar a cabo operaciones de microfiltración a través de membranas específicas.

Las actuaciones para evitar la colmatación pasan por la mejora del diseño de dispositivos, tales como la intercalación de filtros, zanjas drenantes, etc.

El rango de variación entre los parámetros varía a lo largo del tiempo, por tanto, un estándar debe contar con un margen de variabilidad para la consecución de la calidad óptima, independientemente del valor umbral establecido.

Como borrador inicial para una Reglamentación Técnico-sanitaria (RTS) futurible, en la siguiente tabla se presenta el baremo del estándar de calidad propuesto frente a las determinaciones realizadas (Tabla 5.03).

DETERMINACIONES	ESTÁNDAR DE CALIDAD
TSS 5-8 ppm	TSS < 10 ppm
TSD 101,8 ppm	TSD < 150 ppm
COT < 5,5 mg/l	COT < 10 mg/l
COD 1,8-2,8 mg/l	COD < 2 mg/l
OD 5,1-8,8-11 mg/l	OD < 8 mg/l
[CO ₂] = 0,5 – 0,9 mg/l	[CO ₂] < 0,50 mg/l
pH = 8	pH < 7,5-8
C = 191 µS/cm	C < 200 µS/cm
T ^a agua = 5,9 °C	T ^a agua ≈ T ^a suelo
T ^a suelo = 6,1 °C	T ^a agua > T ^a acuífero
Alcalinidad= 64 mg/l CO ₃ Ca	Alcalinidad < 200 mg/l CO ₃ Ca
[NO ₃] = 2 mg/l	[NO ₃] < 10 mg/l
Sobresaturación SiO ₂ = 35 mg/l.	Sobresaturación ≈ 0
Sobresaturación Ca Mg (CO ₃) ₂ = 37,86 mg/l.	Sobresaturación ≈ 0
Salinidad	
H ₂ S ≈ 0	Evitar H ₂ S
MFI: 25 - 30 s/l ²	MFI < 3-5 s/l ²
Bacterias y virus no determinados	Bacterias y virus pendiente establecer límite

Tabla 5.03. Estándar de calidad para las aguas de recarga artificial en el caso concreto de la Cubeta de Santiuste y otros escenarios análogos. Datos basados en datos bibliográficos y en experiencias propias obtenidas en campo, laboratorio y gabinete.





Figs. 5.13. a) – c). Diseño de los dispositivos de corrección de la acidez en las aguas de recarga. El diseño del lecho filtrante puede cumplir además objetivos geotécnicos, como la estabilidad de los taludes (a). La ausencia de gaviones en ocasiones trae como consecuencia el derrumbe de estos muros (b) o el acarcavamiento (c).

6.3. ACTUACIONES EN EL MEDIO RECEPTOR

- **Construcción de balsas y canales complementarios al caz principal**

La construcción de las **balsas** recomendada en acuíferos arenosos aplica taludes 2/1 y profundidades de hasta 2,5 m (MAPA, 1999b) y hasta 3 metros según otras fuentes (MIMAM, 2002). Estos taludes resultan menos tendidos que los existentes en otras experiencias en las que concurre el problema de falta de disponibilidad de espacio. Por ejemplo, en el caso de Ámsterdam, la recarga del acuífero del sistema dunar se realiza mediante **canales** y drenes de 1 m de profundidad y 20 m de longitud, consiguiendo una tasa de infiltración promediada de 20 cm/día. La mayor tasa de infiltración se produce por el centro de la zanja (Olsthoorn, 2002).

En la zona de estudio hay problemas de estabilidad en los taludes del dispositivo con pendientes 1/1 en zona saturada, resultando preciso un mantenimiento continuado durante el ciclo de recarga.

Dado que los vientos dominantes son de orientación norte, noreste y este, la implantación de balsas en la zona de estudio podría realizarse de forma paralela al caz de recarga principal y aprovechando los cortafuegos intercalados en los pinares, o bien terrenos baldíos. El cortafuegos situado frente al basurero clausurado de Coca (Dehesa Tetuán) podría ser un buen enclave para emplazar una balsa de AR que permita la recarga del sector oriental del acuífero. Otras balsas adicionales podrían ser construidas en Villagonzalo de Coca para la recarga artificial estimulada con fines medioambientales.

- **Dispositivos de filtración y decantación**

Son elementos de obra comunes para recarga artificial superficial y profunda. La efectividad de los dispositivos de recarga está condicionada en gran medida por la

calidad del agua, de ahí la conveniencia de realizar un pretratamiento previo para prevenir la colmatación física.

La principal alternativa consiste en intercalar filtros en el circuito de recarga, alternativa que requiere escaso espacio y es barata de implantación, si bien requiere labores de mantenimiento importantes. Se suelen emplear filtros de finos tipo 200 ASTM. Su sistema de limpieza queda integrado en las operaciones de mantenimiento, si bien es viable diseñar estructuras para limpieza automática mediante flujos inversos o incluso empleando el impacto de la gota de lluvia sobre filtros instalados con alta inclinación.

Otra alternativa habitual es la instalación de plazoletas de decantación. Su ubicación debe quedar antes del dispositivo de recarga. Para ello es preciso un dispositivo previo de remanso de la velocidad de las aguas, mediante zig-zag, serpenteos o diques transversales.

Las balsas de decantación intercaladas en el circuito permiten disminuir la velocidad del agua. Es recomendable que estén dotadas de una capa de arena fina en el fondo. Algunos autores recomiendan su “arado suave” mediante un tratamiento con discos antes de ponerlas en funcionamiento (*MIMAM, 2002*).

Otro tipo de dispositivos son los filtros de arena o grava intercalados en el circuito, especialmente a la entrada del dispositivo. Se hace al agua pasar por un empaque de grava intercalado en la tubería, como por ejemplo entre el caudalímetro y la cabecera de la estructura. Se propone un cubo de hormigón relleno de gravilla y/o arenas, que sea fácilmente reemplazable una vez presente indicios importantes de colmatación, de ahí la importancia de emplear materiales naturales presentes en la zona de estudio para llevar a cabo una especie de “minería de transferencia” entre los materiales instalados y los depositados. Su diseño debe contar con bordes redondeados de modo que permita su rápida y fácil extracción con una retroexcavadora convencional (Fig. 5.15).

El empaque debe contar con un filtro mecánico para impedir que la gravilla se incorpore a las aguas de recarga y se distribuyan por el circuito en suspensión.

El lecho de arenas de las balsas de infiltración deberá ser sustituido cada cierto tiempo independientemente de su grado de colmatación.

Una opción adicional para corregir el pH de las aguas de recarga cuando sea preciso es mediante la selección del material del empaque de gravas o filtro de arenas. En aguas ácidas se puede colocar un empaque de grava calcárea, mientras que en aguas excesivamente duras la grava debe ser de naturaleza silíceas para su corrección.

Los materiales empleados pueden cumplir además una función geotécnica de contención de los taludes. Si es preciso se pueden emplear métodos de sujeción como mampostería, gaviones, etc., que permitan la infiltración, retención de los taludes y corrección del grado de acidez de las aguas de recarga (Figs. 5.14 a-c).

La ubicación propuesta para el dispositivo experimental se presenta en la figura 5.25.



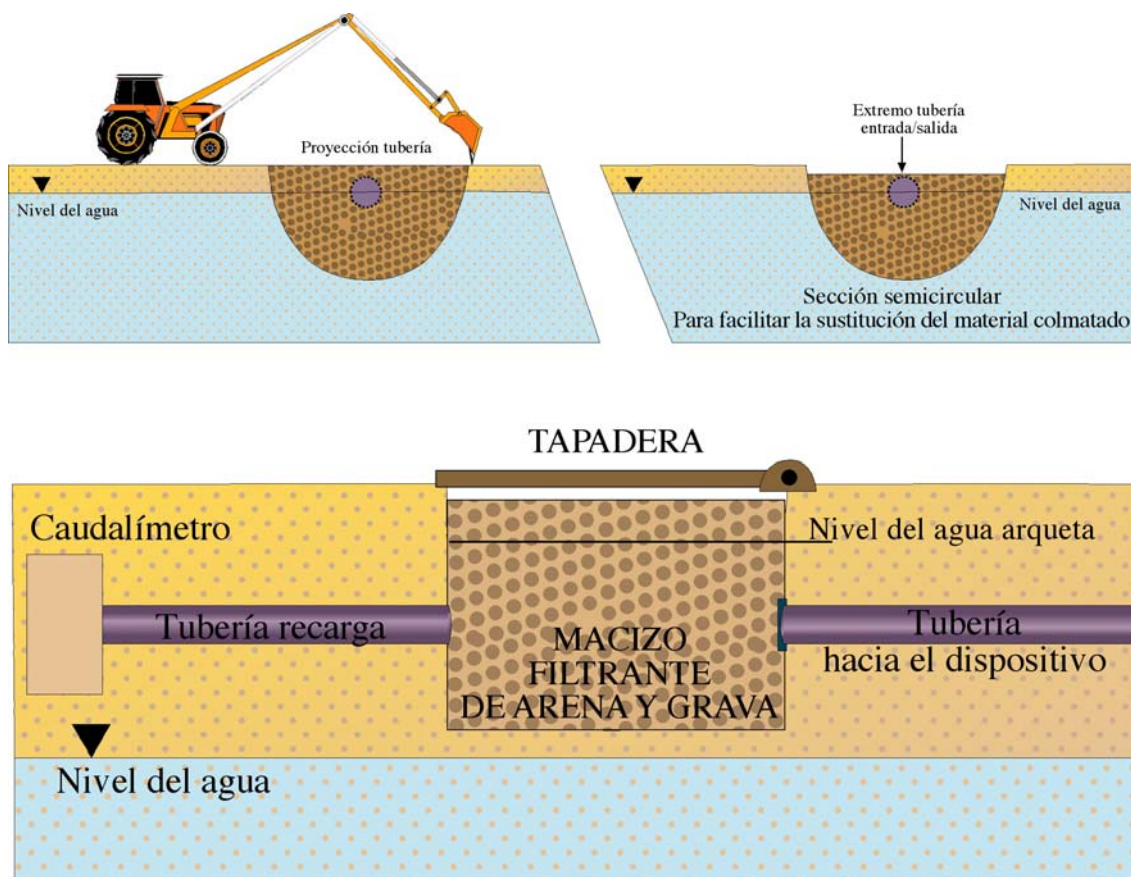


Fig. 5.15. Diseño de los dispositivos de filtración propuestos para ser intercalados en el circuito de las aguas de recarga.

- **Dispositivos y estructuras para minimizar el efecto Lisse**

Las fases gaseosas disueltas en el agua se perfilan como un elemento nocivo a partir de una concentración determinada, al afectar a ciertas reacciones cualitativas y especialmente al comportarse las burbujas como auténticas gravas que impiden mecánicamente la entrada de agua al acuífero.

El gas más abundante es el oxígeno, aunque también es importante la concentración de CO_2 , N_2 , etc. En dispositivos de recarga bajo presión la disolución de gases en el agua está regulada por la Ley de Henri, de modo que a mayor presión parcial de los fluidos, la capacidad de disolución es mayor y consecuentemente la de infiltración menor.

Los dispositivos deben tender a evitar la entrada de aire en el sistema y la oxigenación por batido de las aguas, bien sea al pasar por los rodets de una bomba en casos de inyección o bien por efecto “cascading” y/o “Lisse”. Ambos están basados en el aumento de la disolución de aire por efecto de la agitación de las moléculas de agua y aumento de la superficie de contacto agua-aire.

El efecto Lisse (descrito en el apartado 3.3.1 del Bloque 1) concurre con frecuencia cuando los gases disueltos aumentan su presión parcial, disminuyendo más aún la capacidad de infiltración.

En el dispositivo actual se ha apreciado una cierta influencia del efecto cascading, que conlleva la disolución directa de aire, de modo que la concentración de gases disueltos aumenta a medida que el agua circula por el caz de recarga artificial (Fig. 5.16). En consecuencia, el efecto Lisse generado ha alcanzado cifras del 30% en el primer ciclo de recarga artificial (Bloque 2).



Fig. 5.16. Los dispositivos de parada conllevan un incremento del oxígeno disuelto en las aguas por efecto “cascading.”

Este efecto debe ser minimizado mediante transferencias a través de tuberías o mediante dispositivos de “vasos comunicantes”. En la siguiente figura se esboza un dispositivo genérico para minimizar el efecto de cascading en las aguas de recarga, y por tanto, la cantidad de oxígeno disuelto (Fig. 5.17).

El dispositivo cuenta además con filtros mecánicos inclinados para disminuir la presencia de sólidos disueltos. Los vasos comunicantes constituyen además un punto apropiado para el tratamiento de las aguas mediante la adición de compuestos químicos (DBPs), como puede ser hipoclorito sódico o permanganato potásico, al poder emplazar un depósito sobre los mismos con goteo a través del vaso.

La proposición consiste en implantar dispositivos de este tipo en la mayor parte de las estructuras de parada del caz actual, dado que la concentración de gases disueltos en las aguas es creciente a medida que discurre el agua por el caz.

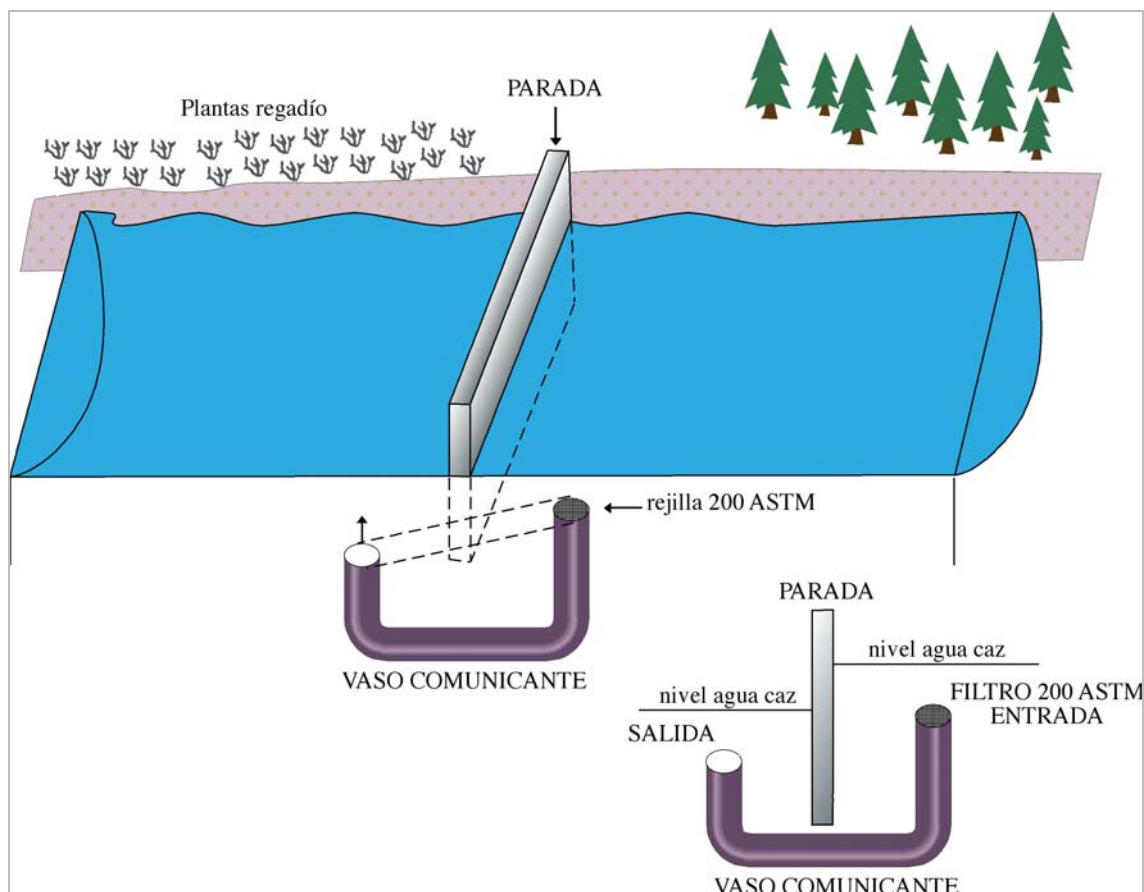


Fig. 5.17. Dispositivos de vasos comunicantes propuestos para evitar el efecto "cascading."

Al efecto conseguido mediante vasos comunicantes habría que añadir un pretratamiento de las aguas de recarga y, previsiblemente, aislar las aguas superficiales del contacto con el aire siempre que sea posible, creando zanjias drenantes, pasos en zonas de infiltración nula mediante tuberías, conducciones cerradas hasta los dispositivos de inyección, etc. De este modo se preservaría a las aguas de la formación de algas y de procesos biocolmatantes en general.

El aumento en la altura de la lámina de agua conlleva menor incidencia de la radiación solar sobre el fondo, pero también procesos de compactación del medio receptor. En general la lámina de agua debe ser inferior de 1,40 m (Custodio y Llamas, 1983), si bien no es recomendable láminas de espesor superior a 0,5 m (Bouwer, 2002).

Otra técnica para controlar la concentración de gases en el agua se basa en el control de la temperatura de las aguas de recarga, si bien tiene importantes inconvenientes operativos como son la congelación durante las heladas y porque las estructuras para control de la temperatura con frecuencia favorecen la disolución de aire de la atmósfera.

El principal inconveniente reside en que las actuaciones apropiadas para un fin determinado son negativas para otros procesos. El aislamiento de la luz solar impide el crecimiento de algas pero permite las condiciones propicias para la supervivencia de determinados virus, etc.

- **Diseño de estructuras para minimizar la evapotranspiración**

En sistemas de recarga superficiales y en determinados tipos de clima, las pérdidas por evapotranspiración directa desde la lámina de agua sobrepasa un porcentaje del 35 % en dispositivos tipo balsa (*Custodio y Llamas, 1983*).

El contacto del agua con la atmósfera favorece además la disolución de aire atmosférico. De este modo, la tendencia debe ir orientada a disminuir la capacidad de evapotranspiración mediante la preservación o aislamiento de la lámina de agua y la atmósfera. Para ello se debe optar por conducciones cerradas en tubería siempre que sea posible, implantar zanjas drenantes, etc.

El tipo de dispositivo genérico propuesto para tal fin se basa en el diseño de una zanja drenante convencional, similar a las empleadas para captar aguas superficiales en *hard rocks*, con la salvedad de que el fondo carece de aislamiento impermeable (Fig. 5.18). Este tipo de zanjas drenantes serían de pequeño tamaño (tramos inferiores a 10 metros de longitud) y fácil acceso para las labores de mantenimiento, por lo que resulta una alternativa barata y apropiada. Debe ir conectada a la tubería directamente o por derivaciones laterales, impidiendo así la aireación de las aguas, evitando su agitación, preservando a las aguas de la luz solar y reduciendo la evapotranspiración.

Las aguas de entrada deben ser pretratadas, dado que la capacidad de incidir sobre dispositivos enterrados resulta mucho más difícil que en dispositivos superficiales durante las labores de mantenimiento.

Se propone implantar este tipo de dispositivos en las zonas de paso, en las inmediaciones de los cruces del caz de AR con las vías de comunicación y por encima de la cabecera del dispositivo, creando derivaciones de la tubería de derivación con diseño en “raspa de pescado” en las cubetas rellenas de sedimentos arenosos localizadas en la zona de tránsito entre la toma del río Voltoya y el inicio del caz.

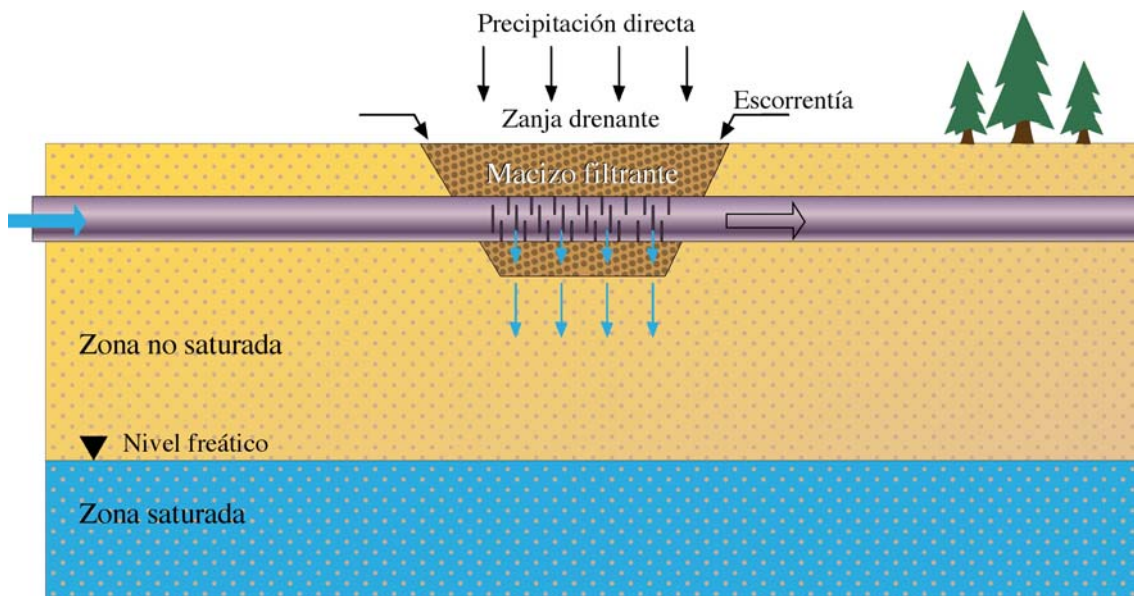


Fig. 5.18. Dispositivo tipo zanja drenante para preservar las aguas de recarga de la luz solar y el efecto de la ETR.

- **Dispositivos para el aprovechamiento de excedentes hídricos en la época lluviosa**

La recarga artificial durante los períodos de mayor pluviometría resultan especialmente conflictivos, dado que concurren unos excedentes hídricos que son desaprovechados en forma de escorrentía con el período en que el terreno se encuentra cercano a la saturación.

Los períodos de fuertes precipitaciones y el efecto que pueden tener las avenidas sobre las estructuras de AR constituyen un importante impacto ambiental, tanto desde un punto de vista cuantitativo, al flocular los polímeros coloidales de los ácidos húmicos del suelo, reduciendo su capacidad de infiltración, como cualitativo, ya que son introducidos finos en el sistema que se depositan en la superficie del caz de infiltración. Por la ley de Stokes, el influjo tiende a crear varios niveles colmatantes granoseleccionados (*Bouwer & Rice, 2001*). De este modo se propicia la generación de un cake en los canales (como es el caso) y fosos de recarga típico de “llanuras de inundación.”

La opción planteada recopila una forma de aprovechamiento de los excedentes hídricos con unos dispositivos de infiltración “semiprofunda”, bien sea pozos como presentados en la figura 5.12 o fosas superficiales en la ZNS.

- **Análisis de la recuperación de humedales hidrodependientes mediante recarga artificial estimulada**

La recarga artificial estimulada se perfila como una de las técnicas más importantes para la recuperación de humedales que presentan dependencia de las aguas subterráneas, ya que permite crear unas condiciones de interacción agua-suelo que posibilita que las aguas de recarga adquieran una calidad química parecida a la originaria.

Hasta la fecha no se han realizado experiencias de este tipo en la Cubeta, por tanto, la proposición se fundamenta en la consulta de antecedentes bibliográficos y en el estudio de su aplicación.

Los aspectos principales a tener en cuenta son la calidad aguas de las aguas originarias (*Dillon et al, 1995*) y aspectos microtopográficos.

La influencia de la **microtopografía** en las actuaciones de recarga artificial localizada es determinante en la calidad de las aguas. Algunas investigaciones realizadas en Minnesota para determinar los efectos de la topografía y de la recarga localizada en el transporte de compuestos químicos de origen agrícola a partir de datos geoquímicos. En ellas ha quedado demostrado que los compuestos que se desplazan rápidamente con el agua son los más afectados por la recarga localizada, concentrándose en zonas deprimidas (*Delin & Landon, 2002*). El escenario de la experiencia ha sido una zona regable sobre suelos arenosos, similar a la zona de estudio.

La escorrentía superficial conlleva un movimiento advectivo de cloruro, nitrógeno nítrico y sulfato hacia las depresiones más alto que hacia zonas más elevadas, con un promedio anual de 5,1; 3,4 y 1,7 veces mayor respectivamente que hacia las zonas elevadas topográficamente 1,4 m.

Otros factores que influyen en el caudal de flujo es el tipo de suelo, la presencia de carbono orgánico y de barreras hidrogeológicas que retarden el flujo vertical de las aguas.

Como consecuencia de esta experiencia se puede establecer un criterio operativo para controlar los incrementos de salinidad en zonas topográficamente deprimidas en acuíferos arenosos y zonas regables, tales como reducir la aplicación de compuestos químicos en las depresiones, donde la recarga se acentúa por la escorrentía superficial, con objeto de mejorar la calidad de las aguas subterráneas y a la par reducir gastos en fertilizantes.

De forma adicional resulta preciso la instalación de barreras que retarden el flujo vertical de las aguas y el control del COD en las aguas de recarga y en el medio receptor (*Delin & Landon, 2002*).

En el caso concreto de nuestra zona de estudio, la recarga inducida o estimulada se presenta como una alternativa apropiada para fines medioambientales. Dado que el quimismo de las aguas de los humedales está condicionado por la evolución química del agua subterránea a lo largo de las trayectorias de flujo del sistema regional (*Rey Benayas, 1991*), las actuaciones propuestas deben tener en cuenta la alta variación hidroquímica entre las aguas del río Voltoya y las aguas precisas para la regeneración hídrica de ciertos humedales, dada la elevada salinidad de las aguas en la mayor parte de ellos.

En este caso la recarga estimulada se basa en determinar una trayectoria de flujo natural y ver que trayectoria artificial se parece más a la natural en cuanto al producto final. Para ello es preciso llevar a cabo estudios de la solubilidad de los materiales y del tiempo de tránsito, facilitando la interacción de las aguas de recarga artificial con el suelo, de forma que la mayor superficie de contacto supla el menor tiempo de residencia. La forma más apropiada es la recarga sobre lentejones salinos de suficiente tamaño “aguas arriba” del humedal objetivo.

El empleo de cuencas salinas naturales (o artificiales) durante los procesos de AR requiere llevar a cabo dos actuaciones básicas (*Jolly et al, 2000*):

- La pluma salina generada debe ser controlada en el espacio y tiempo.
- Se debe limpiar periódicamente la sal y otros elementos tóxicos almacenados en las cubetas sedimentarias.

La siguiente figura muestra los principales factores y procesos que acompañan al proceso de infiltración, bien sea natural o inducida, en una cuenca salina. El flujo vertical y lateral es dependiente de la profundidad del nivel freático y de la configuración del acuífero, especialmente en casos de acuíferos multicapa o presencia de estratos permeables bajo el sustrato salino, que permiten el drenaje profundo del agua infiltrada hacia las zonas de emergencia (Fig. 5.19).



El riesgo de salinización superficial viene acompañado a este tipo de actuaciones, si bien puede ser controlado en función de los objetivos previstos.

Como recomendación operativa, mientras sea posible, las cubetas deben estar posicionadas en áreas drenadas en las que el goteo sea mínimo y a su vez permita a la pluma de infiltración permanecer el mayor tiempo posible en el acuífero (*Leaney et al, 2000; Dillon et al, 1996b*).

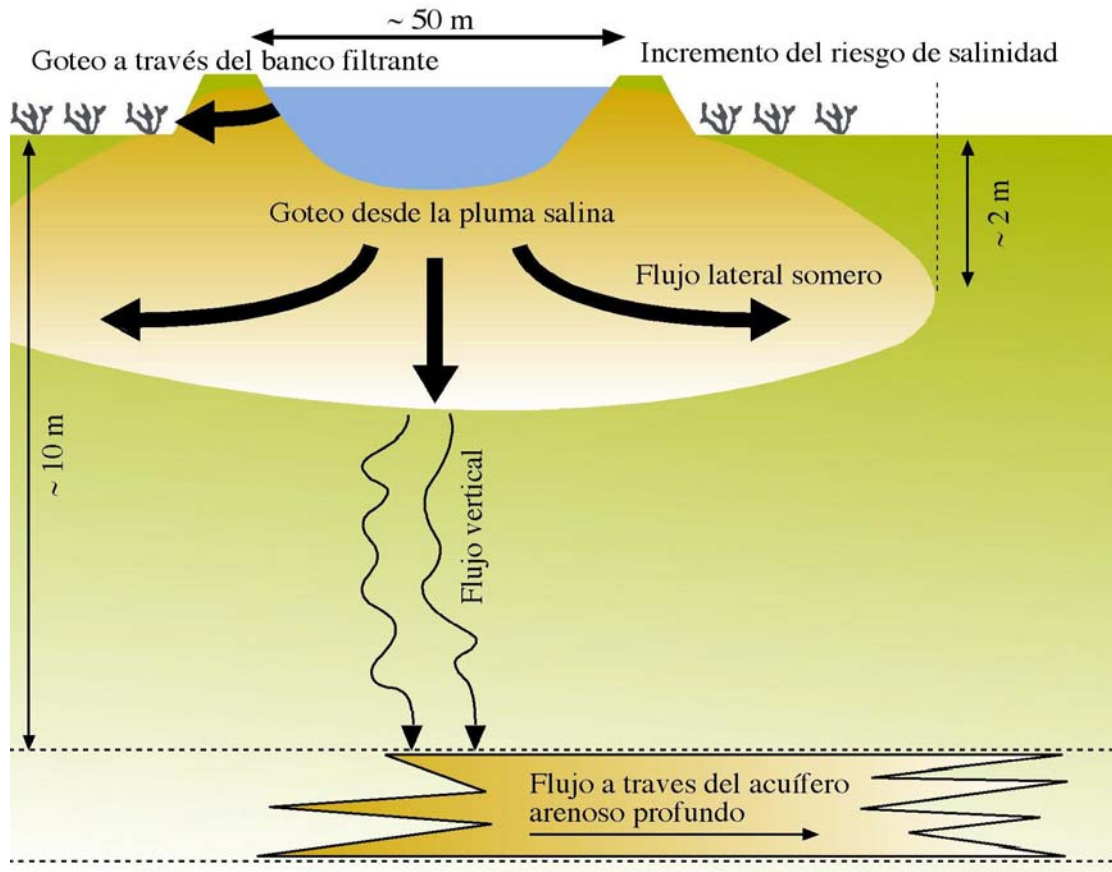


Fig. 5.19. Conceptualización del flujo de aguas y procesos asociados a la infiltración a través de una cuenca salina. Basado en *Leaney & Christen, 2000*.

- **Diseño de dispositivos para recarga estimulada**

A tenor de los procesos que rigen la salinidad y movilidad de iones a través del acuífero, es preciso comenzar el diseño de una serie de estructuras operativas que permitan el control del fenómeno de salinización de las aguas dulces con fines medioambientales.

Entre los dispositivos a elegir para llevar a cabo operaciones de recarga inducida o estimulada cabe destacar:

- **Pozos secos**

Excavados o perforados en la zona no saturada (ZNS). Suelen ser de elevado diámetro. La sedimentación limosa del fondo permite estudiar en cierto modo los procesos de interacción agua-roca mediante su observación minuciosa. Esta alternativa es destacable dada la abundancia de este tipo de pozos en el área de estudio.

- - Trincheras

Dispositivos de escasa anchura (1 m) y gran profundidad (10 m). Cuentan con el inconveniente de su facilidad de colmatación y dificultad de limpieza y mantenimiento.

- Creación de circuitos cerrados

El uso de un circuito cíclico para las aguas, mediante el empleo de un conducto conectado con un pozo salino y la recirculación del agua, se presenta como una alternativa viable y de bajo coste para la salinización inducida.

Un método para controlar el punto idóneo de concentración es el “*test del punto de dilución*”, que permite determinar la concentración ideal, además de aportar información relativa al flujo de las aguas subterráneas en las inmediaciones del sistema, su dirección y velocidad, así como su concordancia con la masa de agua superficial, bien sea una zona riparia o un lago (Lamontagne et al, 2002) (Fig. 5.20).

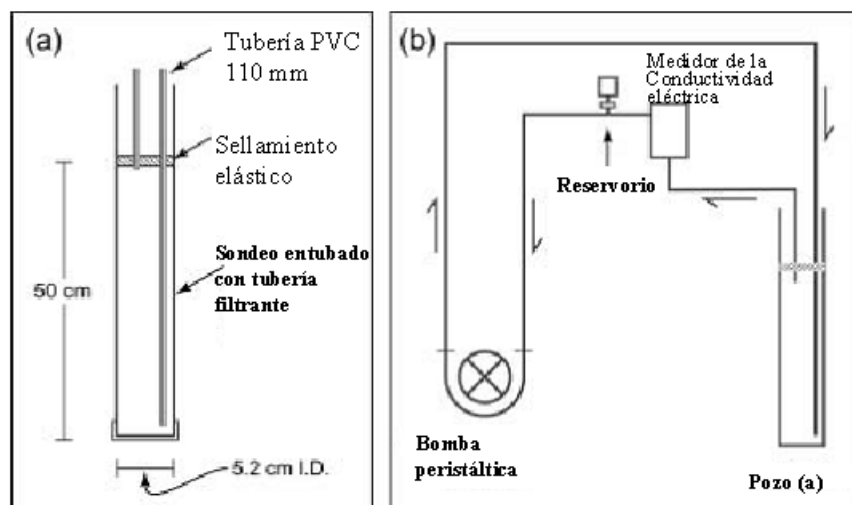


Fig. 5.20. El uso de un circuito cíclico para las aguas, mediante el empleo de un conducto conectado con un pozo salino(a), e impulsado por una bomba peristáltica (b), permite la recirculación del agua. Esta opción se presenta como una alternativa viable y de bajo coste para la salinización inducida (Modificado de Lamontagne et al, 2002).

- Dispositivos específicos de recarga artificial inducida” en la Cubeta

Una alternativa propuesta de aplicación idónea a la zona de estudio es complementar los sistemas de AR superficial con actuaciones de recarga inducida. El método de inducción más viable es el bombeo de pozos ubicados en lugares predeterminados, con objeto a aumentar la recarga en ríos y reservorios superficiales.

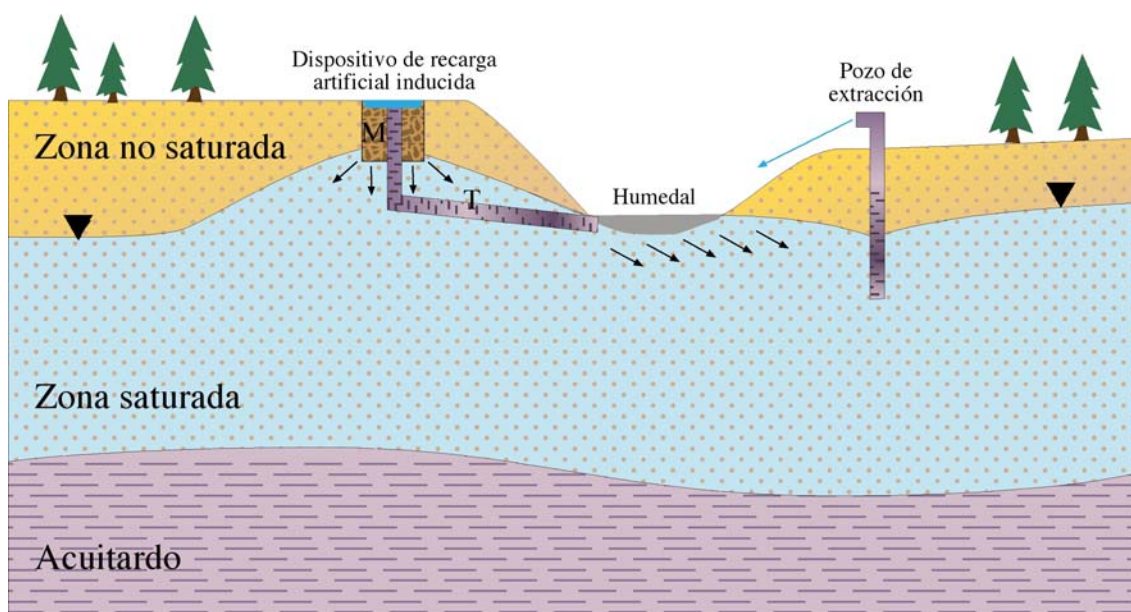
Esta técnica se configura además como la más viable técnica y económicamente para la recuperación de humedales hidrodépendientes, dada la abundancia de captaciones en el sistema y las altas posibilidades de gestión.

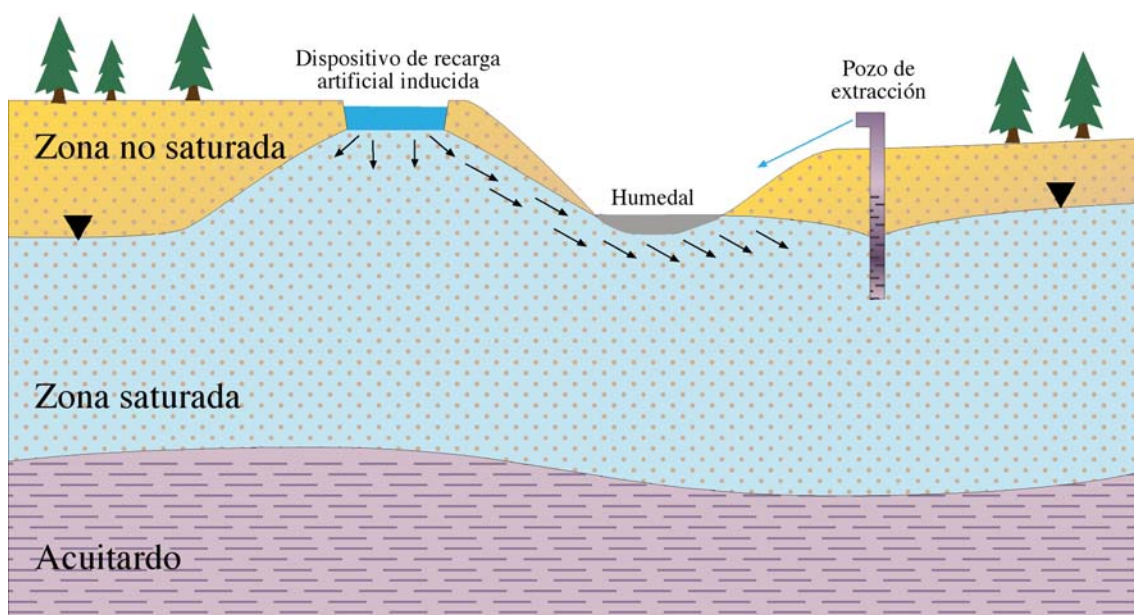
Dada la dispersión de humedales en la zona, en zonas endorreicas o semiendorreicas, resulta viable diseñar dispositivos para la captación de escorrentías superficiales no reguladas y proceder a su regulación.

En general el número de pozos inventariados es tan alto que permite la utilización mancomunada de distintas captaciones según convenga para inducir un sentido preferencial de las líneas de flujo.

Sobre esta base teórica y con objeto de fomentar este tipo de experiencias en la Cubeta, se han diseñado dos tipos de dispositivos de recarga artificial inducida, cuyas características se presentan a continuación y cuya ubicación permitiría la regeneración hídrica de las lagunas de las Eras y de la Iglesia en Villagonzalo de Coca.

Ambos dispositivos cuentan con una zona de llegada, bien tipo balsa o zanja drenante, rellena de materiales salinos naturales. El bombeo de un pozo de extracción induce un gradiente hidráulico que fuerza a las aguas de AR a desplazarse hacia los humedales objetivo y disolver los iones salinos del material natural. La salinidad será proporcional a la superficie de contacto y al caudal de extracción del pozo inductor (Figs. 5.21 a y b). La ubicación propuesta para los dispositivos experimentales se presenta en la figura 5.25.





Figs. 5.21 a) y b). Dispositivo de infiltración mediante recarga artificial inducida en las inmediaciones de los humedales del Complejo de Coca-Olmedo.

Sea cual sea el tipo de dispositivo escogido, es recomendable llevar a cabo alternativas de utilización conjunta que lleven a cabo, al menos, las siguientes actuaciones:

- 1) Pretratamiento del agua. Filtrado previo a través de geotextiles, filtros específicos verticales o bien dispositivos de decantación.
- 2) Construcción de “acuíferos artificiales” para un tratamiento primario equivalente al producido por lagunaje anaeróbico o tanques sépticos.

El polo extremo (agua de recarga de los excedentes invernales del río Voltoya) puede tener un rango de variabilidad relativamente bajo en cuanto a composición química dentro del ciclo de recarga (se ha constatado variaciones más importantes entre el período estival e invernal). En cambio si se han detectado variaciones anchas en cuanto a sólidos en suspensión y materia orgánica disuelta, conforme con las circunstancias climáticas en cabecera de la cuenca, especialmente en situaciones de fuertes precipitaciones y menor caudal para la dilución de vertidos.

De acuerdo con estos condicionantes, el planteamiento de un dispositivo “tipo” se basaría en el siguiente esquema conceptual: Consta de un sistema de recarga bien sea mediante pozos o trincheras que reciben las aguas de recarga. El dispositivo puede tener además instalados aljibes para la captación de aguas de escorrentía. Su salinización se lleva a cabo induciendo la circulación del agua por el acuífero, bien sea mediante bombeo de pozos instalados “aguas abajo” según el gradiente hidráulico, o bien mediante la circulación por circuitos cerrados entre pozos excavados en materiales salinos y los dispositivos de recarga. En este caso es preciso intercalar un medidor de la salinidad/conductividad. Descrito el objetivo y funcionamiento del dispositivo, este necesitaría ser adaptado para cada caso específico (Fig. 5.22).

La circulación del agua a lo largo del acuífero se ajustaría al siguiente esquema teórico:

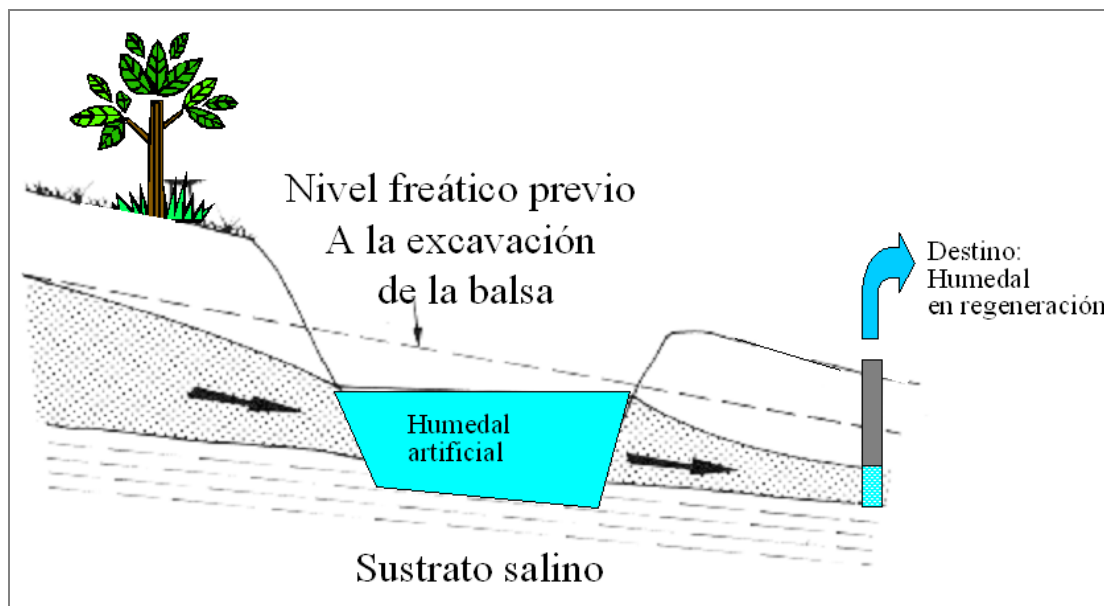


Fig. 5.22. Evolución teórica del nivel freático durante la recarga estimulada. Descenso en cabecera, junto a la zona de infiltración o inyección, y ascenso en la zona topográficamente más deprimida o humedal [aguas abajo según el gradiente hidráulico].

Teniendo en cuenta las diferentes posibilidades de recarga del acuífero que tenemos, la evolución del ecosistema estará condicionada por el método que se seleccione.

Todos estos dispositivos se encuentran en riesgo de malograrse por efecto de las avenidas, por tanto su diseño debe considerar la avenida máxima.

- **Limpieza y mantenimiento de los dispositivos**

- **Diseño de un BCV específico**

A partir de las experiencias de dos ciclos de recarga artificial (AR) en la *Cubeta*, parece absolutamente recomendable la limpieza periódica del lecho de forma simultánea a las operaciones. Para ello, dadas las específicas condiciones de la zona, la morfología del dispositivo de AR, la presencia de frecuentes pasos, paradas, etc intercalados en la estructura y la existencia de una vía de servicio paralela al caz, es recomendable el diseño y construcción de un prototipo de BCV específico, a pequeña escala, que constituya un sistema de descolmatación mecánico y químico integrado en una maquinaria que circula por la vía de servicio. El test del mismo permitiría mejorar el dispositivo.

Este BCV debe contar con una cuchilla o rasqueta para la extracción del cake del fondo, un brazo largo y abatible que permita operar sobre el caz desde la vía de servicio, y su abatimiento al llegar a los pasos, paradas, etc. sin tener que introducir un dispositivo en el caz de recarga que deba ser extraído y vuelto a introducir al avanzar en las labores de limpieza.

El material succionado debe ser desbastado y decantado por gravedad. Cabe la posibilidad de llevar a cabo un tratamiento químico del material antes de su reimplantación, o bien su retirada a vertedero y reemplazo por arenas limpias, dotando al vehículo principal de un sistema de remolque.

Un esbozo de un dispositivo BCV genérico se presenta en la figura 5.23. En caso de obtenerse resultados positivos convendría realizar BCVs a mayor escala.

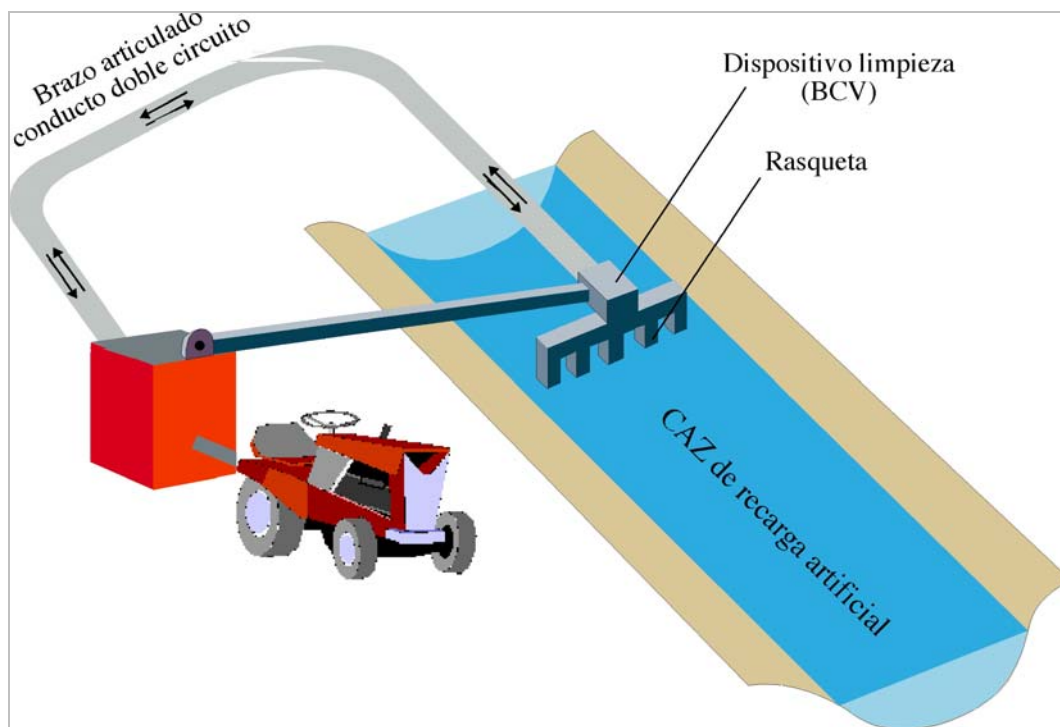


Fig. 5.23. Diseño preliminar propuesto de un BCV específico para la zona de estudio.

La operatividad y éxito del sistema de limpieza puede verse aumentado con la implantación de un geotextil sobre el fondo del caz de AR que retenga los finos, o bien mediante un sistema tipo *furrows* longitudinal a lo largo del caz.

El sustrato del medio receptor debería contar con un estrato drenante de grava cubierto por un geotextil de nylon, sobre el que se distribuye la arena fina del medio. En caso de ser conductos hacia pozos de infiltración, la capa drenante debería llevar en su fondo una lámina de plástico o geotextil impermeable. La secuencia quedaría del siguiente modo: Agua pretratada > arena dunar > geotextil de nylon > empaque de grava > sistema de drenaje >///> lámina impermeable de plástico de fondo > pozo de inyección.

A pesar de la puesta en práctica de los dispositivos y procedimientos enumerados, el grado de colmatación previsiblemente podría alcanzar niveles tan altos como para proceder a la descolmatación periódica de las obras o al abandono de las mismas.

- Otros procedimientos de descolmatación



Se considera la posibilidad de llevar a cabo con cierto éxito otros procedimientos de descolmatación adicionales, como son:

- Dejar secar la instalación de recarga, contrarrestando el hinchado de las arcillas y restituyendo así parte de la permeabilidad. Se trata de una medida temporal e inefectiva si no es combinada con otras actuaciones.
- Permitir el crecimiento de vegetación, cuyas raíces perforan y rompen la zona colmatada facilitando así el posterior paso de agua, y disminuyen la cantidad de nutrientes del suelo. Esta labor se lleva a cabo al termino de cada ciclo de AR. Las especies más indicadas son aquellas herbáceas hidrófilas de ciclo anual corto, rápido crecimiento, alta expansión radicular y facilidad de extracción con raíces. Las plantas deben ser específicas para cada ámbito de actuación, dependiendo de las condiciones geoclimáticas, el sustrato, la catena altitudinal, etc. Algunas especies que pueden cumplir estos requisitos para el ámbito de la Cubeta de Santiuste son:
 - *Dactylis glomerata*
 - *Agrimonia eupatoria*
 - *Althaea officinalis*
 - *Althaea hirsuta*
 - *Carum verticillatum*
 - *Elymus hispidus susp. hispidus*
 - *Galium palustre*
 - *Iris pseudacorus*
 - *Lolium rigidum subsp. rigidum*
 - *Sparganium erectum*
 - *Tetragonolobus maritimus var. hirsutus*
 - *Triglochin palustris*
 - *Ranunculus repens*

Esta técnica resulta apropiada siempre y cuando sean extraídas antes del comienzo de un nuevo ciclo de recarga artificial. En la figura 5.24. se presenta el aspecto del caz de recarga durante el período estival. La proposición se basa en implantar especies adecuadas para los fines pretendidos, además de las que lo hacen de manera natural.

- Escarificación de la parte colmatada. Esta técnica depende de la profundidad de penetración de los procesos colmatantes. Cuando la penetración es poco profunda se puede proceder a eliminar la zona colmatada, retirando el *cake* superficial. Esta medida puede resultar especialmente complicada en caso de que el dispositivo cuente con geotextiles.
- La extracción de la zona colmatada se presta a distintas alternativas: extracción, lavado y reintegración a su lugar previamente al inicio de un nuevo ciclo de recarga, retirada a vertedero de la parte colmatada y sustitución por terreno natural, etc.



Fig. 5.24. Aspecto de algunos sectores del caz encharcados y con implantación de vegetación durante la época estival. El control de las especies implantadas constituye una técnica positiva para preservar la tasa de infiltración en estos sectores del caz.

Además de las técnicas SAT cabe incorporar otro tipo de estructuras de obra y parámetros de gestión, como son los descritos (sistemas de medición en continuo de la evolución de las aguas de recarga, caudalímetros, etc, y, en general, todos los dispositivos de vigilancia, control y seguimiento).

- **Parámetros de gestión y técnicas *ex situ***

Cualquier alternativa a elegir, deberá tener en consideración dos objetivos básicos (*Dillon et al, 1999*):

- Mantenimiento del recurso actual del acuífero en las mejores condiciones de calidad y caudal disponible como elemento de gestión hídrica.
- Garantizar la provisión constante de un caudal de agua para uso de los regantes sin que ello suponga un riesgo para el objetivo precedente.

Además de las técnicas aplicables *in situ*, cabe destacar una serie de parámetros de gestión y técnicas *ex situ*, tales como:

- Elección del período y lugar más idóneos de aplicación de las distintas técnicas *in situ*.
- Inicio de los ciclos de recarga de manera “suave”.
- Control permanente del caudal de entrada y su velocidad, bien *in situ* o mediante telecontrol.

- Seguimiento permanente del quimismo de las aguas durante el ciclo de recarga. Una alternativa recomendable es el empleo de un laboratorio móvil de control por *biomonitoring* durante el período de recarga. También es recomendable el empleo de sondas de tipo multiparamétrico para el control de, al menos, los parámetros TSS, TSD, COT, conductividad, concentración en nitratos, temperatura y pH de las aguas de recarga artificial.
- Una opción adicional que se perfila como importante es la implantación de una estación tipo “SAICA” con transmisión de datos en tiempo real en el río Voltoya junto al azud de derivación, que permita controlar la calidad del agua de recarga y poder paralizar la actuación a distancia o automáticamente.
- Empleo de dispositivos: evitar afección a animales (obstáculos físicos), y al hombre (sistemas de alarma ante inundaciones, guardaniveles telecontrolados, minimizar su impacto visual, etc.).
- Adoptar con prontitud las Mejoras Técnicas Disponibles (MTD) y nuevos descubrimientos de probada efectividad.

- **Programa de Vigilancia y Control**

- Protocolo específico de control de la colmatación basado en el seguimiento de parámetros simples.
- Diseño de protocolos y combinaciones de los aspectos hidromecánicos en el espacio y tiempo correctos.
- Tratamiento de la actuación como un “sistema integral” en el que todos los elementos están interrelacionados.

- **Código de Buenas Prácticas SAT**

Cualquier código aplicable a una zona en la que se lleven a cabo operaciones de AR debe considerar, al menos, las siguientes cuestiones:

- Limitación en el abonado.
- La intervención de los agricultores y de la población más interesada en los procesos de gestión, dota de una mayor flexibilidad a las actuaciones.
- Instalación de depuradoras y minimizar el vertido de efluentes incontrolados.
- Establecimiento y zonificación de un perímetro de protección.
- Regulación del uso público, fomentando los usos científico, didáctico y medioambiental.



Conociendo la respuesta del acuífero se podrá abordar la recarga en enclaves ecológicos o medioambientales adyacentes que precisan una restauración. Para este fin, la técnica de la recarga artificial superficial inducida o estimulada se perfila como la alternativa más apropiada, al permitir que el control sobre las aguas de recarga sea mayor. Algunas de las principales alternativas para las operaciones de recarga inducida son:

- Empleo de pozos secos en desuso para la recarga artificial.
- Trincheras para la conducción de aguas.
- Creación de circuitos cerrados entre el pozo de extracción y la zona de recarga, dotados de una bomba peristáltica.
- Alternativas de construcción conjunta.

6.4. CREACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO

Algunas de las recomendaciones operativas para las implantación de un sistema de recarga artificial integrado son:

- Reducir la compactación del sustrato, limitando la altura de la lámina de agua a un máximo de 1,40 m (*Custodio y Llamas, 1983*).
- Instalación de sistemas de alarma, guardaniveles, etc. en los dispositivos de recarga y en los piezómetros de observación en registro continuo para el control de la profundidad de alerta, de la altura de la lámina de agua, caudal entrante, etc. Estos piezómetros pueden ir instrumentados para el televolcado de datos mediante dispositivos “*inlayer*.”
- Implantar dispositivos anticorrosión en elementos metálicos y entubaciones, como puede ser pilas galvánicas, cátodos de sacrificio, etc.
- En los dispositivos dotados de sistemas de filtración tipo geotextiles y membranas, resulta apropiada la técnica del lavado inverso (*backwashing*) de los filtros y la desecación de los procesos colmatantes previamente a su limpieza.
- Reducción de la presencia de bacterias en el agua de recarga mediante el empleo de desinfectantes, aislamiento de la radiación solar directa y reducción de nutrientes.
- Reducción del total de sólidos disueltos (TDS) en las aguas de recarga mediante dispositivos de remanso, filtración y establecimiento de un sistema de vigilancia y control de su evolución, como puede ser la instalación de una sonda registradora en continuo con almacenamiento de datos o volcado a un centro operativo por vía GSM.
- Técnicas de reducción de la colmatación química: acidificación, bombeo del pozo de inyección a diario, extracción periódica del estrato más superficial de la superficie colmatada, adición de compuestos químicos tipo polifosfatos, sustancias



oxidantes o compuestos químicos. Esta adición debe estar combinada con métodos hidráulicos para facilitar su incorporación al medio y mejorar su efectividad (*Pérez-Paricio & Carrera, 1998b*).

- Control del pH del medio receptor mediante la adición de ácidos o bases dependiendo de las condiciones del medio (calcio, ácidos, bases, etc.) con especial cuidado en evitar la generación de precipitados.
- Evitar la entrada de oxígeno al sistema y la generación de gases mediante un diseño adecuado de las estructuras y dispositivos, presiones parciales positivas de los gases en el fluido, agua de recarga a mayor temperatura que la del acuífero, evitar el efecto cascading en los dispositivos, etc.
- Minimizar la concentración en nitrógeno fomentando procesos de denitrificación y generando ambientes propicios en el acuífero. Una nueva técnica que se encuentra en período experimental y que posiblemente sea implantada con prontitud en instalaciones de AR de Holanda es el “*anammox*”, que permite la oxidación aeróbica del amonio (*Van de Graaf et al., 1995; Kuenen & Jetten, 2001*).
- Al término del ciclo de recarga, rastrillado del cake superficial, ataques químicos con baños de ácido, adición de calcio, secado o congelación, empleo del BCV, etc. (*Pérez-Paricio & Carrera, 1998b*). La actuación puede ser realizada simultáneamente si el dispositivo está dotado de un sistema dual que permita recargar por un lado mientras se somete a limpieza el otro.

• Instrumentación del sistema

En cuanto a la instrumentación del sistema y en especial la instalación de dispositivos de control de la infiltración existen varias opciones. Su finalidad principal es la determinación de la conductividad hidráulica no saturada (*Knosat*) y en consecuencia, de la tasa de infiltración efectiva. De este modo se puede disociar la infiltración real de agua en el acuífero de la cantidad de aire que se infiltra en el sistema.

Los dispositivos más empleados para este fin son los permeámetros de disco, infiltrómetros de tensión o minidisco y lisímetros fijos junto a las estaciones de control, cuya elección será dependiente de cada caso específico y de la dotación presupuestaria.

Estos métodos requieren de una adecuada calibración del instrumental y ser implantados en zonas de escasa pendiente para obtener resultados veraces, lo que en nuestro caso es seguro. El control en tiempo real permitirá crear un gráfico en el que se marcará el volumen (m^3/h) infiltrado y el nivel de los pozos de medida (m). Los pozos o piezómetros de medida no deberán estar situados a una distancia superior a los 10 m.

En principio se propone instalar infiltrómetros de minidisco en ubicaciones cercanas a las estaciones de control de aforos y calidad. Su medición se llevaría a cabo durante las campañas de medición de las redes de control, es decir, 12 veces durante el ciclo de recarga y 2 durante el período estival.

El tercer grupo de parámetros a controlar son los relativos a la calidad del agua. La instrumentación de análisis y medida de la calidad debe estar orientada a la



determinación, en tiempo real, de ciertos parámetros mediante electrodos multiparamétricos. La ubicación de los dispositivos sería similar a las estaciones de control del caudal, contando con la infraestructura prevista, como es la alimentación por células fotovoltaicas, la protección del instrumental mediante garitas comunes y el empleo del mismo sistema de volcado de datos por telecontrol mediante dispositivos tipo *MDS3* al ordenador del centro operativo por vía GSM.

Los dispositivos deben ir albergados en garitas de protección antivandálicas e intercalados a lo largo del caz. Su ubicación adyacente a pasos facilita las labores de mantenimiento.

El control de los sólidos en suspensión y total de sólidos disueltos y su variación espacial y temporal sirve para estimar la cantidad de sólidos que se incorporan a las aguas de recarga procedente de la escorrentía, viento, etc. Esta medida requiere el empleo e instalación de varios turbidímetros, o bien la determinación directa en campo de los parámetros TSD, SS y desarrollo de colonias bacterianas. Una alternativa operacional es la medición de la turbidez a lo largo del caz de AR en campo cumpliendo la norma ISO 7027; o bien serían muestreadas para su determinación posterior en laboratorio en un turbidímetro tipo ISO 7027 –GLP con conexión a PC.

Los parámetros inestables más importantes son la temperatura, el total de sólidos disueltos, los sólidos en suspensión, el oxígeno disuelto y el carbono orgánico total en las aguas de recarga. El número de dispositivos sería similar al del control de la cantidad y de la infiltración, creando para ello unas estaciones de control integral que alberguen los tres tipos de dispositivos descritos para el control de la cantidad, calidad y efectividad (tasa de infiltración). El control de estos parámetros permitirá el seguimiento, en tiempo casi real, de la evolución de determinados impactos y la evaluación de su gravedad.

En caso de detectarse procesos de colmatación graves, la solución más barata y viable sería el desplazamiento, unos pocos metros, de los dispositivos de recarga, sustituyendo los preexistentes por caz. Esta opción resulta relativamente fácil, dada la disponibilidad de terreno en la zona. También podría ser remplazado el material sin modificar el trazado del caz.

En caso de detectar bajas tasas de infiltración conviene estudiar los motivos y actuar en consecuencia, habilitando la otra opción en todos los sistemas duales. Por ejemplo, en casos de baja infiltración por helada, convendría habilitar los dispositivos de infiltración semisuperficial y profunda a zonas del acuífero no afectadas por la congelación.

En casos de extrema gravedad por circunstancias ocasionales y adversas, como puede ser situación una situación de avenida en el río Voltoya con el subsiguiente aumento de la carga de materiales en suspensión en el agua de recarga, sería procedente habilitar todos los mecanismos de infiltración disponibles, llegando incluso a cerrar el dispositivo de entrada directamente.

Las labores de mantenimiento permiten evaluar la intensidad y magnitud de los impactos concurrentes, y detectar aquellos no identificados. Por tanto cumplen una doble misión: mejorar las estructuras y dispositivos, e identificar y evaluar los impactos.



Los sistemas de Vigilancia y Control permitirán conocer qué aspectos deben ser tenidos en cuenta antes de llevar a cabo cualquier proyecto de obra en un escenario análogo, con objeto de ajustar el diseño a los resultados previsibles.

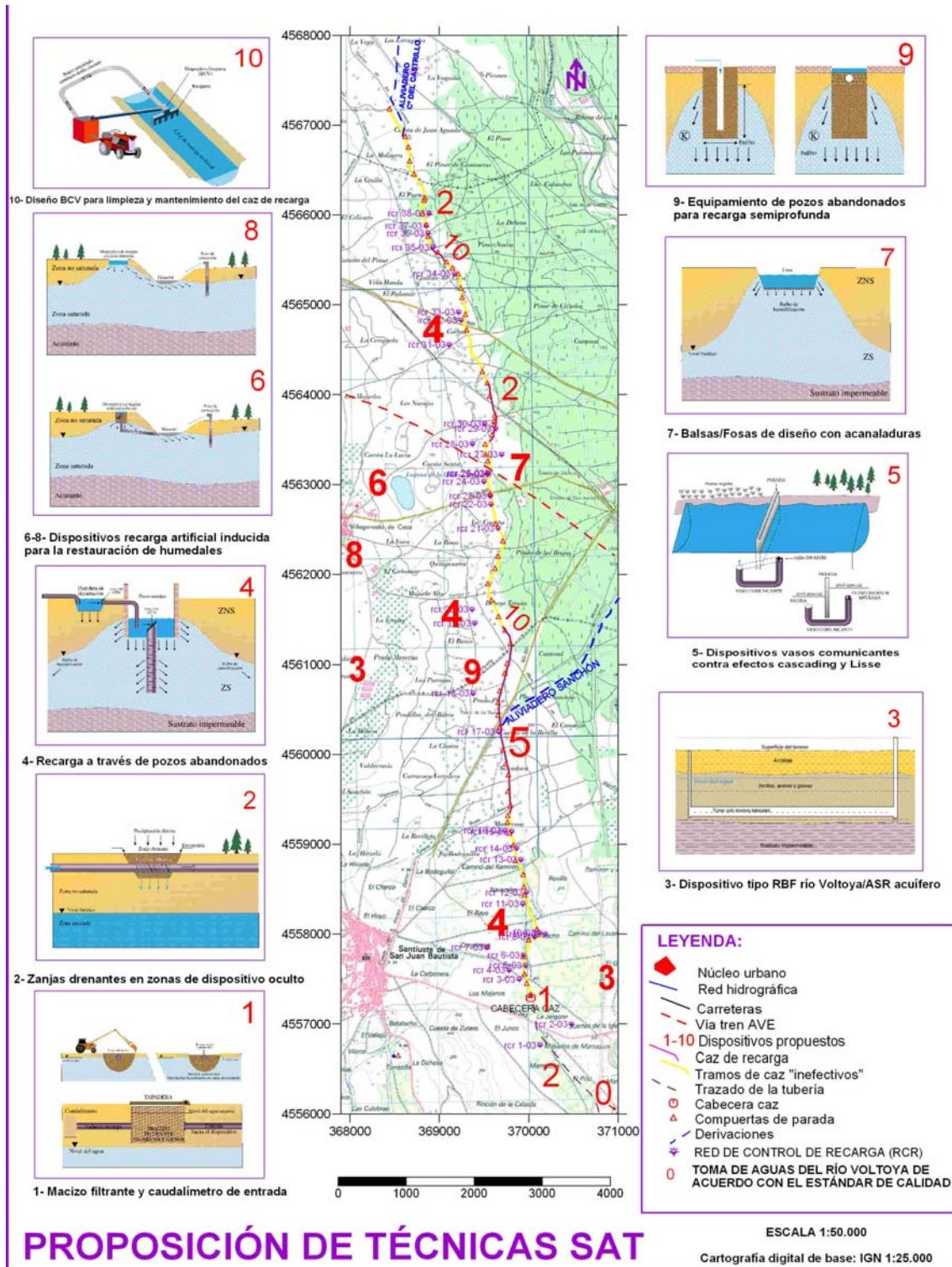
De este modo es conveniente anotar y publicar una serie de normas prácticas relacionadas con el diseño de los programas de vigilancia y control y una memoria de resultados de su seguimiento. Este caso debe ser particularmente importante porque el sistema de recarga sea novedoso, se trate de un prototipo experimental o bien se encuentre en fases de implantación, como es nuestro caso, las experiencias previas deben permitir el diseño de dispositivos y actuaciones de efectividad cada vez más alta.

Este criterio debería ser escrupulosamente respetado en casos de recarga artificial relacionados con recuperación de humedales o usos medioambientales en sentido tradicional, dada la escasez de experiencias al respecto en el estado español.

El seguimiento de la experiencia en la *Cubeta* permitirá obtener nuevos indicios en un futuro próximo, de ahí la necesidad publicar los resultados en los foros de investigación sin demora.

A tenor de los distintos impactos y disfunciones encontradas y basándonos en el conocimiento alcanzado del acuífero, en la figura 5.25 se presenta una cartografía con la ubicación de las distintas técnicas SAT propuestas para la Cubeta de Santiuste, que tienen por objeto alcanzar una mayor efectividad de los dispositivos y minimizar los impactos medioambientales generados.

Fig. 5.25. Proposición de técnicas SAT para la mejora de la efectividad de la recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Página siguiente).



PROPOSICIÓN DE TÉCNICAS SAT





7. RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL BLOQUE 5

Antes de planificar actuaciones de recarga artificial de acuíferos (AR), es preciso optar por el método más apropiado, bien sea por sistemas de recarga en superficie, en profundidad o mixtos. Siempre que sea posible son preferibles los sistemas de infiltración superficial, ya que facilitan las labores de tratamiento de la colmatación y las técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT).

Tras analizar las experiencias obtenidas y mediante la aplicación del sistema de ensayo y error, se concluye en que un estudio de estas características requiere un conocimiento tridimensional y exhaustivo del medio físico donde se lleve a cabo la actividad.

La disponibilidad de agua para llevar a cabo las labores de recarga artificial no queda garantizada en períodos de sequía prolongados. De este modo, hay que tener en cuenta la posibilidad de llevar a cabo actuaciones complementarias a la recarga artificial superficial que permitan el riego en períodos de sequía. La única alternativa viable, además de los trasvases, que son escasamente contemplados en el desarrollo de esta tesis, es la inyección profunda o la instalación de dispositivos de almacenamiento y recuperación en los acuíferos (ASR). El acuífero regional desarrollado en el subsuelo de la *Cubeta* es apropiado para tales fines.

El estado de la cuestión y el análisis de la legislación han confirmado la necesidad de elaborar un estándar de calidad para las aguas de recarga artificial en el estado español, máxime si esta técnica cobra vigor en el futuro. Por ello se ha elaborado un borrador para una futura Reglamentación Técnico Sanitaria (RTS) relativa al estándar de calidad de las aguas de recarga artificial para las condiciones físicas de acuíferos arenosos como el estudiado, caracterizada por el control exhaustivo de procesos colmatantes y de oxígeno disuelto en las aguas.

A modo de síntesis, en las figuras 5.26 a) y b) se presenta un resumen de las principales técnicas a aplicar en cada caso concreto, con objeto de diseñar dispositivos de recarga artificial de máxima efectividad. La figura ha sido dividida en los cuatro apartados considerados en este Bloque 5, que son los relativos al agua de recarga artificial en cuanto a cantidad se refiere, en cuanto a calidad, las actuaciones sobre el medio receptor [incluyendo el diseño de dispositivos (*in situ*)], y por último, las técnicas y parámetros de gestión para el Programa de Vigilancia y Control y para la elaboración de Códigos de Buenas Prácticas *ex situ*.



Agua de recarga (cantidad)

- **Almacenamiento** temporal en reservorios superficiales.
- Control **velocidad circulación** aguas recarga.
- Evitar operaciones durante **ciclos de helada**.
- Empleo de **cámaras termostáticas**.
- Criterios **selectivos origen**.
- **Limpieza y mantenimiento**.
- Empleo **BCVs**.

Agua de recarga (calidad)

- **Preselección**: Criterios selectivos origen aguas de recarga. **Filtración y decantación** aguas AR, etc. (membranas, líneas de fangos, filtros, empaques, etc.).
- Trampas de **escorrentía** y estructuras de decantación y remanso.
- **Dispositivos** anticorrosión.
- **Diseño** y preservación **taludes** (mampostería, gaviones, etc.).
- **Diseño fondo** en acanaladuras o *furrows*, empleo geotextiles.
- **Limitación altura lámina de agua**. **Pretratamiento** tipo **DBPs** (*Disinfection by Products*): Cl, I, O₃, H₂O₂, rayos UV, etc.
- Limpieza **vegetación** durante AR/ plantación específica en periodo estival.
- **BCVs**.
- **Evitar aireación** aguas AR: vasos comunicantes, estructuras exentas, velocidad aguas, **Desaireación** por piezómetros, aumento distancia puntos inyección-extracción, etc.
- **Sistemas duales**: Secado de algas, secado natural del lecho, criotratamiento, agrietamiento cake, escarificación de la parte colmatada y limpieza/reemplazamiento.
- **Aislamiento** con la atmósfera/**luz solar**.
- **Medaka**.
- **Lechos filtrantes y aditivos químicos** para la eliminación de costras calcáreas (ácidos, hidróxido sódico, quelantes, polifosfatos, defloculantes, etc).
- Evitar efecto reciclaje.
- **Desnitrificación**, "*anammox*", riego seleccionando profundidad emplazamiento bomba.
- **Evitar la salinización natural**: recarga puntual y barreras en zonas salinas.



Medio receptor (suelo y acuífero)

- **Pretratamiento** del agua de recarga.
- **Secado natural** del lecho y agrietamiento.
- **Criotratamiento**.
- Empleo de **sistemas duales** que permitan la limpieza de uno mientras el otro está operativo.
- **Bombeo inverso** en pozos cercanos al caz.
- **Alternancia de bombeo normal e inverso** (*Wash in- Wash out*).
- **Lavado inverso** (*backwashing*) en geotextiles, membranas y filtros.
- Empleo de técnicas de **limpieza tipo jet**.
- Técnicas de **regeneración** en pozos de recarga **mecánicas** (cepillado y arañado de paredes y fondo) y **químicas** (empleo de aditivos químicos).
- Técnicas de **limpieza** con la mayor cadencia posible.
- **Bombeo diario del pozo de inyección**.

Criterios / códigos de gestión / buenas prácticas

- **Parámetros de gestión y técnicas ex situ**
 - Elección del **periodo y lugar** más idóneos
 - Inicio ciclos AR "**suaves**".
 - Control **caudal de entrada** y su **velocidad**.
 - **Seguimiento** del **quimismo** de las aguas durante el ciclo de recarga.
 - Empleo de **dispositivos** de **no afección** a fauna y personas.
 - Adoptar con prontitud las **MTD**
- **Programa de Vigilancia y Control**
 - Protocolo específico de **control de la colmatación**.
 - Protocolos de los **aspectos hidromecánicos** correctos en el espacio y tiempo.
 - **Sistema integral**- todos los elementos están interrelacionados.
- **Código de Buenas Prácticas SAT**
 - Limitación en el **abonado**.
 - **Intervención agricultores** en gestión.
 - Instalación **depuradoras** y minimizar vertido efluentes.
 - **Perímetro de protección**.
 - Regulación del **uso público**.

Figs. 5.26 a) y b). Síntesis del Bloque 5. Principales actuaciones que pueden ser llevadas a cabo para alcanzar la máxima efectividad en los dispositivos de AR.

En conclusión, el diseño de los dispositivos y su manejo depende en gran medida de las condiciones específicas del suelo, sus características y funcionamiento hidrogeológico, la climatología y la calidad del agua de recarga artificial.

De acuerdo con *Bouwer, 2002*, la *regla de oro* en recarga artificial es empezar con cautela, aprender sobre la marcha y expandir las estructuras de acuerdo con lo aprendido y según las necesidades. Dada la alta complejidad de ejecución de las operaciones de AR, resulta preciso contar con plantas piloto o tramos de “caz” experimentales, donde puedan ser ensayadas nuevas tecnologías, dispositivos, etc. para “*empezar con cautela*.”

La aplicación de las actuaciones más recomendables en cada caso conlleva la interacción de impactos medioambientales de signo contrario, de modo que las actuaciones apropiadas para un fin determinado son negativas para otros procesos. Por ejemplo el aislamiento de las aguas para que no se oxigenen impide que la luz solar ataque a los virus presentes, pero si ésta incide se generan algas cuyo ataque con compuestos químicos puede provocar sinergismos, etc. De este modo la alternativa más recomendable es la creación de un sistema integrado en el que la evaluación de los impactos de signo positivo sobrepase a la de los de signo negativo.

De este modo, se concluye en que cualquier planificación de las actuaciones debe tener **carácter integral y flexible** ante los cambios que, con toda seguridad, se van a producir en el medio.



CONTRIBUCIONES A LA EDUCACIÓN AMBIENTAL

PROPUESTA DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Principio 19 .- Es indispensable una labor de educación en cuestiones ambientales, dirigida tanto a las generaciones jóvenes como a los adultos y que preste la debida atención al sector de población menos privilegiado, para ensanchar las bases de una opinión pública bien informada y de una conducta de los individuos, de las empresas y de las colectividades inspiradas en el sentido de su responsabilidad en cuanto a la protección y mejoramiento del medio en toda su dimensión humana. Es también esencial que los medios de comunicación de masas eviten contribuir al deterioro del medio humano y difundan, por el contrario, información de carácter educativo sobre la necesidad de protegerlo y mejorarlo, a fin de que el hombre pueda desarrollarse en todos los aspectos.

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Estocolmo, 1972.



ÍNDICE DEL BLOQUE 6

MEMORIA

ÍNDICE DEL BLOQUE 6	923
BLOQUE 6.- CONTRIBUCIONES A LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	925
1. INTRODUCCIÓN.....	925
2. HILO CONDUCTOR.....	925
3. LA EDUCACIÓN AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA PARA DAR A CONOCER LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS	927
3.1. ESTADO DE LA CUESTIÓN	927
3.2. ASPECTOS GENERALES DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y ESTRATEGIAS APLICADAS A LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS	928
3.2.1. Premisas generales de las que parte la educación ambiental	928
3.2.2. Premisas específicas de la educación ambiental en relación con la recarga artificial de acuíferos	928
3.3. OBJETIVOS DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL	929
3.3.1. Objetivos generales.....	929
3.3.2. Objetivos específicos de la educación ambiental en relación con la AR de acuíferos.....	929
3.4. LOS DESTINATARIOS.....	930
3.5. ESTRATEGIAS DE EDUCACIÓN AMBIENTAL	930
4. PROPUESTA DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	940
4.1. LLUVIA DE IDEAS PARA FUTURAS LÍNEAS DE I + D.....	940
4.1.1. Estudio de las analogías y diferencias entre las distintas experiencias a nivel mundial ...	940
4.1.2. Criterios aplicados a la obra civil	940
4.1.3. Técnicas para la cuantificación de los tiempos de residencia del agua en el acuífero	940
4.1.4. Cambio climático y recarga artificial.....	940
4.1.5. Estudios de hidroquímica y calidad en la zona no saturada. Procedimientos específicos	941
4.1.6. Elaboración de modelos de gestión hídrica integrados para abastecimiento y regadío en la Cubeta de Santiuste, considerando la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas	941
4.1.7. Técnicas de teledetección en recarga artificial para obtener una metodología para la investigación de recursos hídricos.....	941
4.1.8. Enlazar la presencia de flora y fauna en los humedales con la eficiencia de la recarga artificial	942
4.1.9. Elaboración de un RDL relativo a la reglamentación técnica para la calidad de las aguas de recarga artificial superficial y profunda.....	942
5. CONCLUSIONES DEL BLOQUE.....	944
CONCLUSIONES GENERALES	945





BLOQUE 6.- CONTRIBUCIONES A LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los objetivos inicialmente propuestos, cabe esperar que gran parte de las innovaciones tecnológicas futuras contribuyan eficazmente a la gestión hídrica, tanto para aguas superficiales como subterráneas.

Para ello es preciso facilitar el acceso a la información y mejorar la educación e información hidrológica de los usuarios, facilitando así su participación.

Este Bloque se ha planteado como un “cajón de sastre” donde se unen dos aspectos diferentes, aunque relacionados de manera indirecta: Primeramente, la educación ambiental, de la cual adoptamos su metodología y forma de actuar para divulgar la recarga artificial de acuíferos, haciendo propuestas de estrategias de información, formación y divulgación, que podrían ayudar a mejorar el conocimiento sobre la materia y potenciar actuaciones que se encuentran más en consonancia con las nuevas ideas actualmente en voga sobre desarrollo sostenible, aplicadas tanto al recurso agua, como a las infraestructuras necesarias para su acumulación y posterior uso.

Posteriormente, se proponen nuevas líneas de Investigación y Desarrollo (I+D) en consonancia con la tarea emprendida en esta tesis doctoral.

Ambos aspectos tienen en común su base didáctica y su proyección futurista.

2. HILO CONDUCTOR

Siguiendo el planteamiento metodológico llevado hasta ahora, se presenta un esquema del Bloque 6, en aras de agilizar su seguimiento y comprensión.

En común con los apartados anteriores, se presentan los apartados Introducción e Hilo conductor. Estado de la Cuestión y Materiales y métodos son específicos de los dos subapartados de este bloque: *Educación ambiental y líneas de investigación y desarrollo*.

En el apartado dedicado a la educación ambiental, se asumen las premisas y objetivos generales de la educación ambiental y, posteriormente, se intenta aplicar específicamente al caso concreto de la recarga artificial de acuíferos (e.a. AR), estableciendo grupos de destinatarios a los que dirigir el mensaje, y las diferentes estrategias de información, formación o divulgación que podrían llevarse a cabo para mejorar el nivel de conocimientos sobre esta técnica novedosa.



Queda así establecida la base para la posterior elaboración de proyectos específicos, que permitan acercar el alcance de la técnica de la A.R. de acuíferos a la población, bien sea como educación formal, como educación ambiental o como mera divulgación.

En la segunda parte se mencionan una serie de propuestas de investigación basadas en aspectos que no han podido ser abordados en el desarrollo de esta tesis doctoral, como catálogo de posibles actuaciones a llevar a cabo para complementar el grado de conocimiento sobre la Cubeta de Santiuste, y, especialmente, sobre la recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales.

Finalmente se extraen una serie de conclusiones específicas del bloque, como introducción a la batería de conclusiones finales del trabajo de investigación.

El “*hilo conductor*” aparece sintetizado en el esquema siguiente, con mención de los principales apartados (Fig. 6.01).

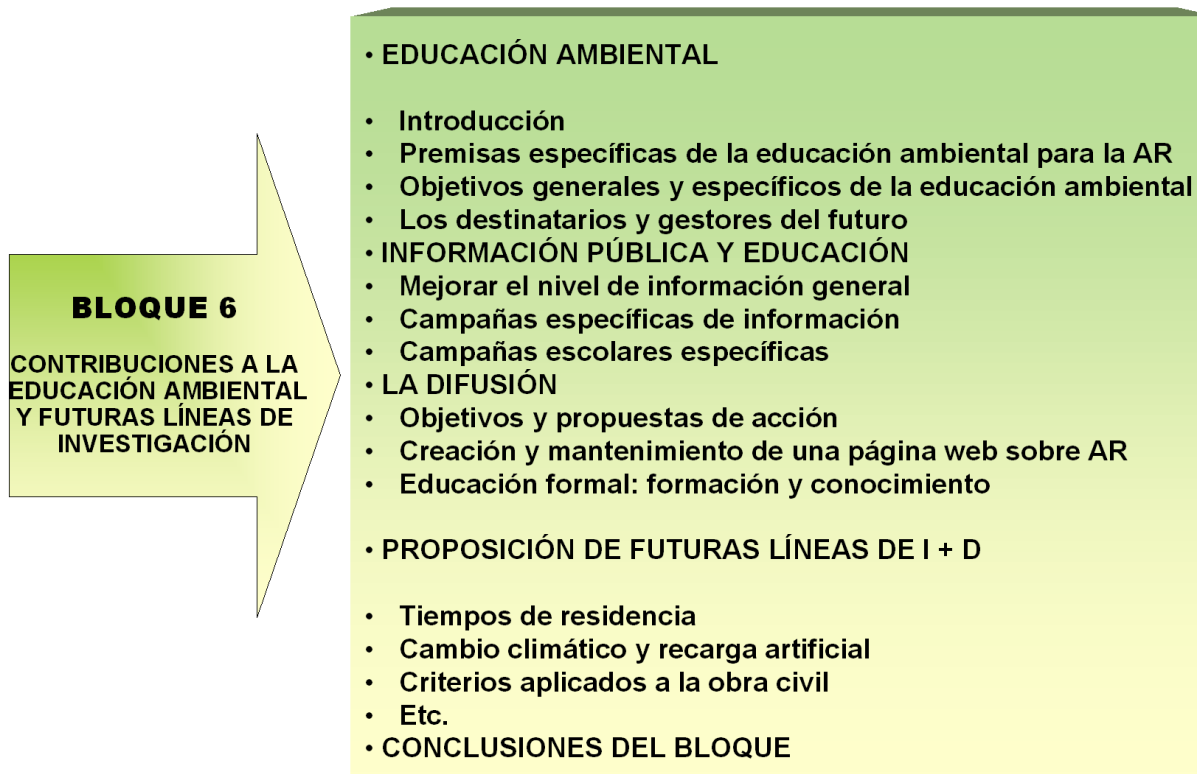


Figura 6.01. Esquema argumental del Bloque 6, denominado: “ Contribuciones a la educación ambiental y futuras líneas de investigación”.

3. LA EDUCACIÓN AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA PARA DAR A CONOCER LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

3.1. ESTADO DE LA CUESTIÓN

España se puede considerar el país con mayor déficit hídrico de toda la Unión Europea. De hecho, el sureste peninsular, enmarcado en las provincias de Murcia y Almería, es la única zona desértica propiamente dicha de todo el continente. En algunos puntos, en los que el clima se puede considerar árido o semiárido, las precipitaciones no superan los 250 mm anuales y la temperatura media anual es superior a 17°C.

Desde el punto de vista de la economía del bienestar y del progreso, tan en boga en nuestros días, el agua se ha convertido en uno de los factores determinantes en el desarrollo de las sociedades modernas, y su demanda no se intuye estable, sino, todo lo contrario, se prevé un crecimiento exponencial en el consumo de agua, en proporción directa con fenómenos como el aumento de las poblaciones humanas, la intensificación de la segunda residencia, el incremento del ocio y turismo, la transformación de los cultivos de secano en cultivos de regadío...

Todo ello conlleva una necesidad creciente de agua, siendo éste un recurso escaso y limitado, lo que conduce, sin duda, a enfrentamientos y situaciones conflictivas de muy difícil solución, puesto que la premisa de partida es que el agua “no sobra nunca” y su escasez va necesariamente unida a un estancamiento en el crecimiento y generación de la riqueza.

La mayor parte de las propuestas incluidas en los últimos planes hidrológicos españoles van enfocadas principalmente a la construcción de nuevos embalses en superficie y al trasvase entre cuencas. La primera opción conlleva la pérdida de suelo fértil y un gasto elevado en infraestructura y obra civil. En el caso de la segunda, y tal como se ha podido comprobar a lo largo del año 2003, provoca graves enfrentamiento territoriales.

Ante esta situación, la recarga artificial de acuíferos se presenta, por tanto, como una medida complementaria que ayudaría a resolver o paliar, en la medida que se vaya avanzando en su investigación, estos conflictos. Cabe preguntarse, por tanto, qué motivos o causas determinan la poca aplicación de esta técnica en nuestro país. Entre las posibles respuestas hay que llegar, sin duda, a la conclusión de que la principal causa es el desconocimiento generalizado que existe y la poca difusión existente de las experiencias llevadas a cabo hasta el momento.

Por otro lado, la población en general tiene escaso conocimiento de qué es un acuífero y cómo funciona, y, por tanto, mucho menos acerca de la posible opción de llevar a cabo su recarga artificial durante las estaciones de superávit hídrico para su posterior uso en las estaciones estivales.

La educación ambiental se presenta como una herramienta valiosa para conseguir un mayor grado de información y conocimiento, así como una estrategia para construir una sociedad formada por personas con los conocimientos y actitudes necesarios para adoptar

posiciones críticas y participativas respecto a la conservación de los recursos naturales y a la calidad de vida.

3.2. ASPECTOS GENERALES DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y ESTRATEGIAS APLICADAS A LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

Según la definición de la UICN (1970), la educación ambiental es un...

“Proceso que consiste en reconocer valores y aclarar conceptos con el objeto de fomentar destrezas y aptitudes necesarias para comprender las interrelaciones entre el hombre, su cultura y su medio biofísico”.

3.2.1. Premisas generales de las que parte la educación ambiental

Para cambiar pautas de consumo, hábitos de vida y otros aspectos generales de la sociedad moderna resulta imprescindible la **participación de todos los ciudadanos**.

Esta participación debe hacerse efectiva en la toma de decisiones políticas a través de grupos sociales relevantes.

Para ello es preciso que el ciudadano tenga los conocimientos suficientes para situarse en una posición relevante en la toma de decisiones.

La Administración es la responsable directa de la formación del ciudadano, así como de la difusión de los aspectos relevantes que afectan al medio ambiente, y de la creación de los instrumentos necesarios para facilitar la participación ciudadana.

3.2.2. Premisas específicas de la educación ambiental en relación con la recarga artificial de acuíferos

Es indispensable que tanto la sociedad como los responsables políticos reconozcan que el uso actual del recurso agua no es sostenible, y, por tanto, un objetivo común de todos los ciudadanos debe ser el de reorientar las pautas de desarrollo, consumo y comportamiento para avanzar hacia la sostenibilidad.

Estos cambios implican compartir la responsabilidad a escala nacional, regional, local y personal, lo que se ha dado por llamar la **“responsabilidad compartida”** entre los poderes públicos, empresas públicas y privadas y los ciudadanos.

Todas las actuaciones educativas deben tener en cuenta el **“principio o enfoque precautorio”**, que no es otra cosa que evitar la aparición de los problemas mediante una atención específica sobre los agentes y las actividades que perjudican el recurso agua y agotan sus reservas, poniendo en peligro su sostenibilidad al rebasar los límites de su recuperación natural o inducida. Por tanto, la **reutilización**, el **reciclaje** y el **ahorro** son actuaciones fundamentales para evitar el despilfarro y la merma del recurso agua, y deben ser los principales puntos a tener en cuenta en cualquier campaña de educación ambiental, junto con la presentación de “nuevas tecnologías” y mejoras técnicas.



Estas dos premisas de responsabilidad compartida y enfoque precautorio, aparentemente sencillas, conlleva no pocas dificultades y complejidades. No es posible llevar a cabo ninguna de las dos sin que se produzca una mayor formación de profesionales y gestores; una mayor y mejor información dirigida a los ciudadanos y, especialmente, a los empresarios. Algunos de los medios para conseguir tal fin son la divulgación de manuales de buenas prácticas; y la puesta en marcha de mecanismos de participación pública efectiva, a través de la cual se consiga, de una forma real, la **corresponsabilidad de todos**.

3.3. OBJETIVOS DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL

3.3.1. Objetivos generales

La finalidad principal de la educación ambiental consiste en que el grupo social o el individuo, partiendo del conocimiento de su realidad inmediata, consiga unos cambios de conciencia, de actitudes y conductas que, mediante un método de análisis crítico, fomente su propia responsabilidad y participación en la solución de los problemas ambientales en cooperación con los demás.

3.3.2. Objetivos específicos de la educación ambiental en relación con la AR de acuíferos

- 1) Las actuaciones educativas relativas a la recarga artificial de acuíferos deben cubrir el objetivo general de la educación ambiental de “implicar a toda la sociedad”: alcanzar a todos los sectores de la población, pero especialmente a aquéllos en quienes recae la toma de decisiones o ejercen mayor influencia social y tienen, por tanto, mayor responsabilidad: administraciones, legisladores, empresas, educadores, medios de comunicación, etc.
- 2) Promocionar la formación específica en AR a los colectivos profesionales especializados en la temática de hidrogeología y, por supuesto, responsables y gestores de la Administración pública.
- 3) Difundir la técnica de AR de acuíferos, aportando información y resultados de aquellas experiencias llevadas a cabo en España y/o experiencias desarrolladas en otros países, especialmente Holanda, Australia y Estados Unidos, los cuales llevan aplicando esta técnica desde hace décadas.
- 4) Crear y mantener herramientas de información versátil, de fácil acceso y manejo, y de fácil actualización. A este respecto, Internet se configura como el medio más apropiado hoy en día.
- 5) Crear y mantener herramientas de participación activa por parte de los beneficiarios directos y de la población en general.

3.4. LOS DESTINATARIOS

Si seguimos lo enunciado en las premisas, todas las actuaciones de educación ambiental deben ser dirigidas a la totalidad de la sociedad. Bien es cierto, sin embargo, que no se puede difundir el mismo mensaje, ni el mismo nivel de conocimientos, de forma generalizada y discrecional. Es muy importante, por tanto, que se establezcan grupos homogéneos a los que transmitir el mismo mensaje: contenidos, lenguaje y metodología deben ser los adecuados a cada grupo social. Y no únicamente en cuanto al nivel de conocimientos del grupo destinatario, sino también debe atenderse a su mayor o menor grado de responsabilidad.

Por ello, proponemos dos posibles clasificaciones de destinatarios: por un lado, atendiendo a su grado de conocimiento, y, por otro, atendiendo a su grado de responsabilidad y rol social.

Según el grado de conocimiento, se pueden distinguir tres grandes grupos:

- a.1) Especialistas.
- b.1) Población en general
- c.1) Estudiantes.

Según el grado de responsabilidad y rol social, se pueden distinguir otros tres:

- a.2) Personas con capacidad para resolver el problema: políticos, planificadores, técnicos, consultorías, etc.
- b.2) Personas involucradas en el problema: agricultores, industrias...
- c.2) Personas que padecen el problema: todos.

Todas las estrategias que se utilicen para conseguir el objetivo previsto, deben ir claramente dirigidas a estos grupos definidos de destinatarios.

3.5. ESTRATEGIAS DE EDUCACIÓN AMBIENTAL

Las estrategias de educación ambiental deben ser múltiples: incidencia en el sistema educativo formal en su conjunto, campañas de comunicación dirigidas al gran público, los programas destinados al sector empresarial y sindical, el desarrollo de una gestión ambiental participativa por parte de las administraciones, la integración de la educación en los planes de desarrollo, etc.

Teniendo en cuenta los grupos de destinatarios enunciados anteriormente, se establecen las siguientes estrategias de educación:

1. Dirigidas a los grupos especialistas y a las personas con capacidad de resolver el problema: grupos a.1) y a.2).
 - Crear y organizar **foros de encuentro**. Proponemos como iniciativas, las siguientes:



- Organización, a nivel nacional, de un Congreso Anual sobre Recarga artificial de Acuíferos.
- Planteamiento y presentación de una candidatura para la celebración en España de las Jornadas Internacionales sobre Recarga de Acuíferos, que se celebran cada tres o cuatro años, por ejemplo: ISARG-95 (International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater) Orlando, Florida (USA), TISAR-98 (Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater) en Ámsterdam (Holanda); ISAR-2002 (International Symposium on Artificial Recharge) en Adelaida (Australia) e ISMAR-2005 (International Symposium on Management of Aquifer Recharge) en Berlín, (Alemania) (Figs. 6.02 a y b).



Figs. 6.02. a y b. La asociación Internacional de hidrogeólogos organiza simposiums sobre recarga artificial de acuíferos cada tres o cuatro años. En 2002 se celebró el ISAR 4 en Adelaida (Australia). El próximo 2005 será el ISMAR en Berlín (Alemania).

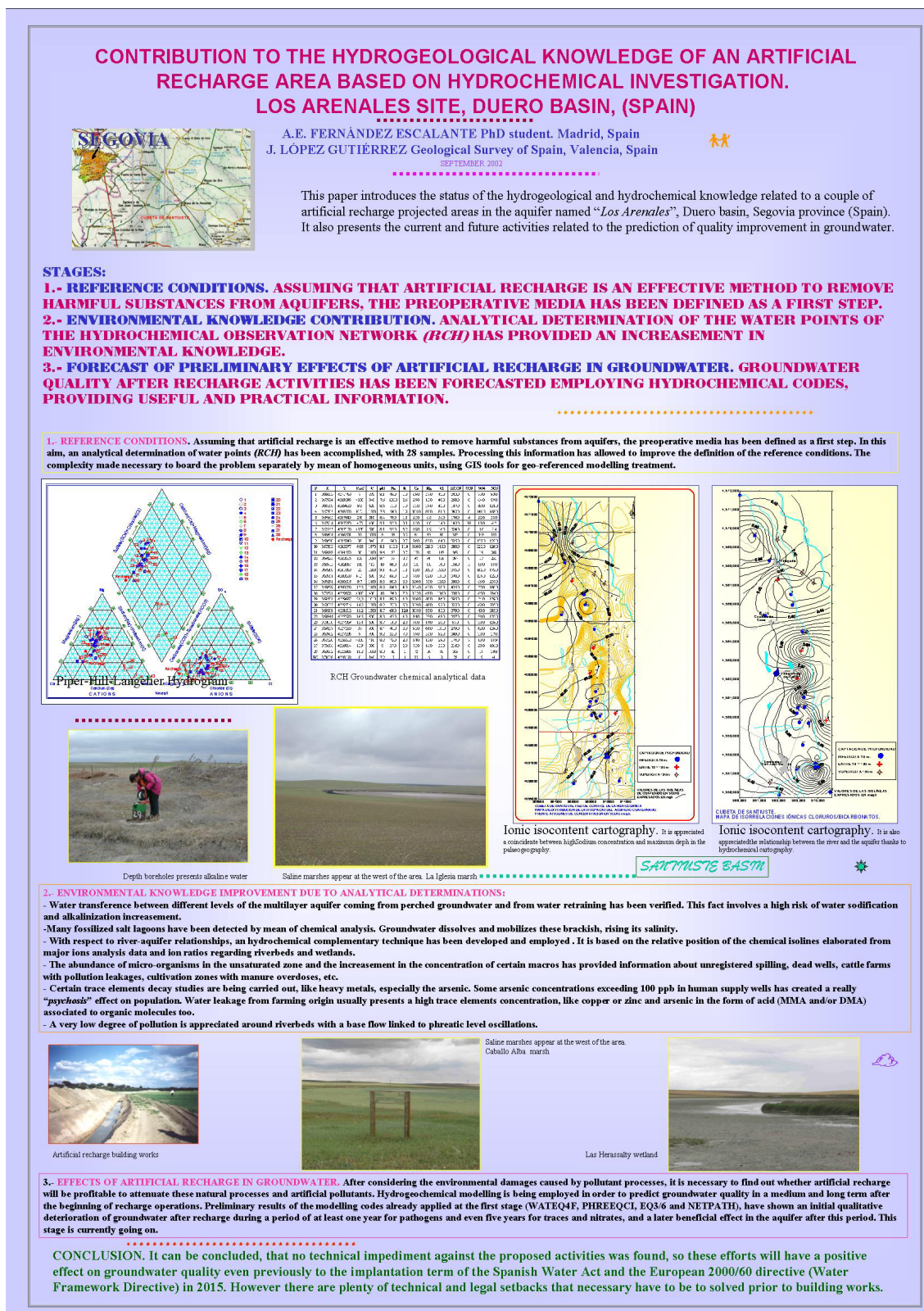
- Organizar jornadas y cursos específicos, dirigidos a profesionales que deseen mejorar su formación, tanto en un ámbito nacional como internacional (Figs. 6.03 a y b).



Figs. 6.03. a y b. Visita guiada a las instalaciones de ASR para el almacenamiento profundo en Australia. Los excedentes de las operaciones son utilizados para fines medioambientales.

- Promocionar la creación de **medios de difusión**: sería especialmente interesante la publicación de números monográficos que atiendan los diferentes aspectos tecnológicos y bibliográficos necesarios para la buena información y formación de todo interesado en profundizar en el tema de la recarga artificial de acuíferos. Gran parte de ellos deberían ir redactados en lenguaje sencillo y de fácil comprensión para agricultores y usuarios no especialistas y carentes de una alta formación hidrogeológica.
- Organizar **cursos de especialización** o “master” en recarga de acuíferos. En los que se incluyan visitas monitorizadas a las estructuras, dispositivos y experiencias de recarga artificial ya existentes en España y países cercanos.





Figs. 6.04. Póster divulgativo de las experiencias desarrolladas en la Cubeta de Santiuste presentado en foros técnicos.

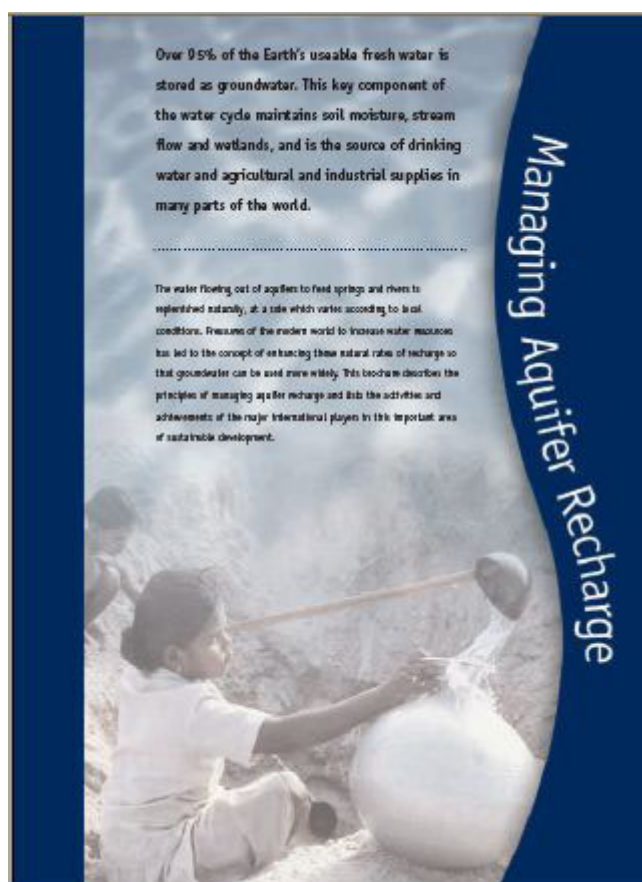
- Edición de forma periódica (anual o bianual) de **informes técnicos** con las últimas novedades o experiencias, en especial las mejoras técnicas disponibles (MTD) y nuevos descubrimientos relativos a la calidad de las aguas, técnicas de



tratamiento del suelo y acuífero (SAT), parámetros de gestión, programas de vigilancia y control, códigos de buenas prácticas, uso de la recarga artificial para objetivos medioambientales como la recuperación de humedales degradados, creación de espacios de ocio, etc. (Fig 6.04).

2. Dirigidas a la población en general: grupos b.1) y c.2).

- Organización de **campañas de divulgación** general, utilizando los grandes medios de comunicación: radio y televisión: programas específicos, reportajes, documentales, entrevistas, etc., en programas ya existentes y que están especializados en temas medioambientales y en diferentes emisoras/cadenas.
- **Publicaciones** divulgativas que atiendan la problemática general del agua y las diversas soluciones existentes, pros y contras, con una explicación somera de cada una de ellas y sin dejar de lado el marco legal que subyace a todas las actuaciones dado que, *la recarga artificial es un vertido*.
- Notas de prensa descriptivas en ediciones en papel y digitales.
- Creación de páginas *web* informativas y amenas relacionadas mediante *links* con las principales paginas técnicas y educativas.



Figs. 6.05. Tríptico específico de recarga artificial de acuíferos presentado en Australia al término de la calebración del simposio ISAR 4.

EL ADELANTADO DE SEGOVIA - Microsoft Internet Explorer

Archivo Edición Ver Favoritos Herramientas Ayuda

← Atrás → Búsqueda Favoritos Multimedia Imprimir Carpeta

Vínculos Guía de canales HotMail gratuito Inicio de Internet Lo mejor del Web Microsoft Personalizar vínculos

EL ADELANTADO DE SEGOVIA 20/05/2003  **Cámara Segovia**

Portada Publicidad Contacto Suscribirse Hoy

Noticias

Local
Provincia
Cuéllar
Castilla y León
Deportes
Última Página

Elecciones 2003

Visto y No Visto

Otras Secciones

Lonja Agropecuaria
Humor
Cultura
Opinión
Cartas al Director

Hemeroteca

Servicios

- Agenda
- Cine
- Farmacias
- Transportes
- Inmobiliaria
- Motor

Provincia - Santiuste de San Juan Bautista

Finalizan las obras de recarga de la cubeta de Santiuste

El agua circula en una tubería enterrada durante más de diez kilómetros y otros diez a cielo abierto



Lugar donde brota el agua y comienza la recarga de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista / PENALOSA

Provincia

- Montes: "Seguiremos luchando por modernizar el municipio"
- El Juzgado autoriza al municipio a desmantelar una antena de telefonía móvil
- El bibliobús de la Diputación celebró una jornada de cuenta cuentos
- Cerca de 300 personas forman parte de la Asociación de Amigos
- Homenaje a la dulzaina segoviana
- El municipio concluye las obras del tanatorio de la calle El Sol
- La Asociación de Jubilados prevé viajar a Cuenca y Asturias

InfoSegovia.com

Todos los servicios a tu alcance:

- Web Cam
- Rutas Turísticas
- Monumentos
- Visitas Guiadas
- Oficinas Turismo
- Restaurantes
- Alojamientos
- De Copas
- Fiestas



AUTO SCOUT 24

Marca

EL ADELANTADO DE SEGOVIA - Microsoft Internet Explorer

Archivo Edición Ver Favoritos Herramientas Ayuda

← Atrás → Búsqueda Favoritos Multimedia Imprimir Carpeta

Vínculos Guía de canales HotMail gratuito Inicio de Internet Lo mejor del Web Microsoft Personalizar vínculos

EL ADELANTADO DE SEGOVIA 20/05/2003  **SEGOVIA** PATRONATO PROVINCIAL DE TURISMO

Portada Publicidad Contacto Suscribirse Hoy

Noticias

Local
Provincia
Cuéllar
Castilla y León
Deportes
Última Página

Elecciones 2003

Visto y No Visto

Otras Secciones

Lonja Agropecuaria
Humor
Cultura
Opinión
Cartas al Director

Hemeroteca

Servicios

- Agenda
- Cine
- Farmacias
- Transportes
- Inmobiliaria

Local - Economía

Cañete inaugura la primera obra del PHN de la región

El ministro de Agricultura destaca la relevancia de esta nueva infraestructura agraria



/ KAMARERO

Local

- Los técnicos aconsejan retirar zonas de talud en la Cuesta de los Hoyos
- La Junta incoa el expediente para la declaración de BIC de la iglesia de La Trinidad
- Los sindicatos apoyan a vecinos y equipo del "Ezequiel Gonzalez"
- La Junta inicia los trámites para el desdoblamiento de la CL-601
- Unos 3.600 segovianos participarán en la campaña "Aprende a nadar"
- Estampas para la imaginación

InfoSegovia.com

Todos los servicios a tu alcance:

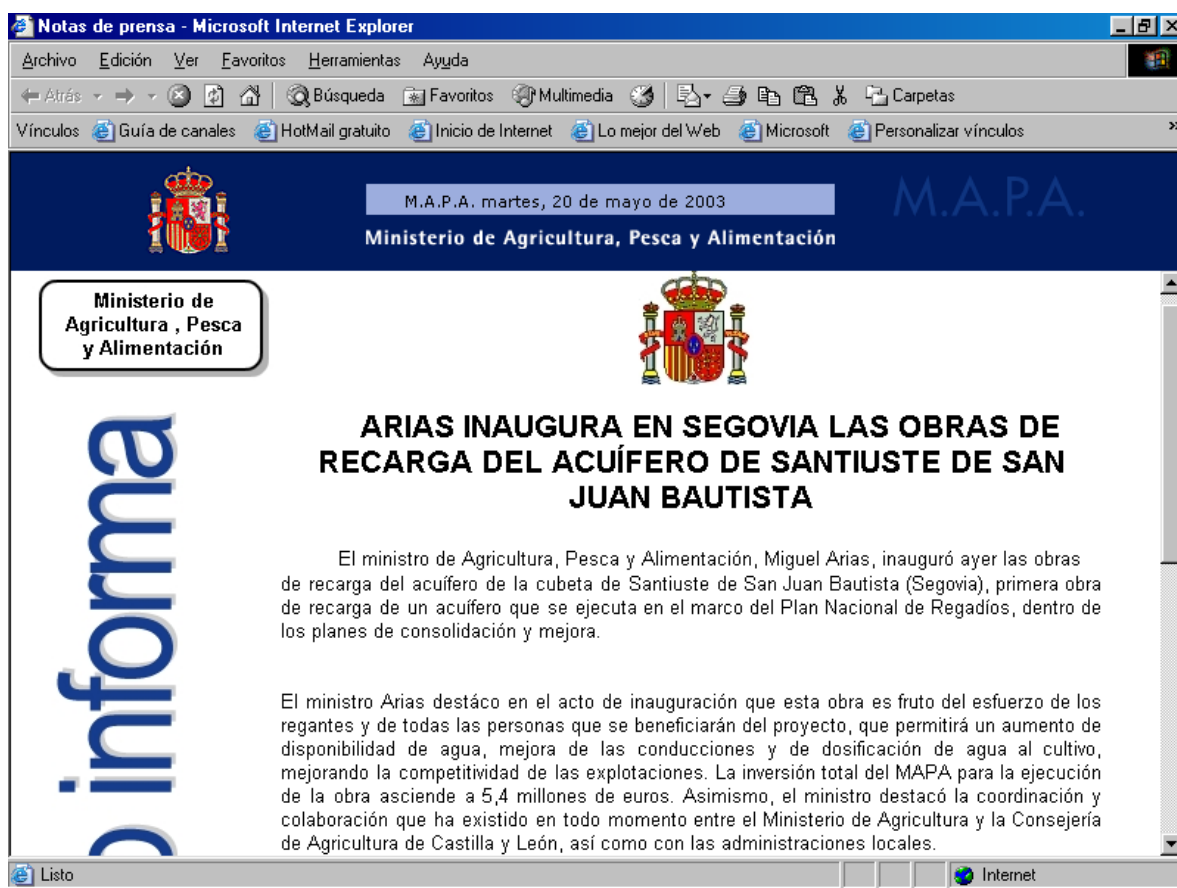
- Web Cam
- Rutas Turísticas
- Monumentos
- Visitas Guiadas
- Oficinas Turismo
- Restaurantes
- Alojamientos
- De Copas
- Fiestas



AUTO SCOUT 24

Marca





Figs. 6.06. a) – c). Notas de prensa en edición digital del Adelantado de Segovia y del Servidor del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

La Universitat Jaume I apoya la recarga artificial de acuíferos y zonas húmedas

El éxito del sistema depende de la **obtención de aguas de calidad** y lugares apropiados, mientras los ecologistas temen que se **consolide la sobreexplotación** de ecosistemas

Maria Josep Picó, Valencia

Los investigadores del departamento de hidrogeología de la Universitat Jaume I de Castelló (UJI) apoyan los mecanismos de recarga artificial de acuíferos y esgrimen que este tipo de procesos también pueden ser útiles para la restauración de las zonas húmedas del litoral. En la Comunidad Valenciana se están estudiando diferentes propuestas similares al proyecto de la Universidad de Murcia —pormenorizado ayer por **Levante de Castelló**— basado en canalizar y embalsar agua procedente de las precipitaciones torrenciales para su posterior aprovechamiento durante las épocas secas desarrollado en la Universidad de Murcia y liderado por el profesor valenciano Melchor Senent.

El geólogo Juan Tuñón, de la UJI, recuerda que la Conselleria de Obras Públicas dispone de planes para la recarga artificial de acuíferos del territorio valenciano desde el año pasado. Este experto en infiltración hídrica destaca entre las dificultades para implantar este tipo de almacenamiento y recuperación de caudales subterráneos *«las posibilidades de obtener agua de calidad, como también la elección de un espacio adecuado para construir las infraestructuras necesarias de captación de recursos»*.

Tuñón expone que, por ejemplo, el agua procedente del trasvase del Ebro —un proyecto que el departamento no apoya a título particular— *«debería destinarse directamente a los acuíferos, e incluso, para mejorar las condiciones de las zonas húmedas o el delta del Millars, en lugar de destinarla al embalse de Sitjar, como está previsto en el plan hidrológico nacional (PHN), ya que el cau-*



VICENT MARTÍ

UTILIZACIÓN DEL AGUA. El Ebro podría utilizarse para recargar deltas y humedales como el de Almenara.

■ Las organizaciones agrarias defienden el proceso innovador de aprovechamiento de recursos hídricos

dal desviado será de muy peor calidad».

El secretario general de la Unió de Llauredors i Ramaders, Joan Brusca, considera que almacenar agua en los acuíferos *«es una medida muy interesante que hay que aprovechar, junto a la consecución de agua a través de trasvases como el del Ebro»*. Para el presidente de la Asociación Valenciana de Agricultores, Cristóbal Aguado, se trata de una solución *«muy factible»*.

■ «Una solución muy puntual»

Los colectivos ecologistas mantienen dudas sobre el sistema estadounidense de *almacenamiento y recuperación de agua en acuíferos*, conocido con sus siglas en inglés ASR. El representante de Acció Ecologista Agró, William Colom, afirma que este proceso *«es una solución muy puntual, incluso beneficiosa para frenar la intrusión marina, pero en ningún momento es capaz de solucionar el problema de los desequilibrios hídricos»*. Colom advierte de que la inyección de agua en los acuíferos *«puede consolidar la sobreexplotación de las aguas subterráneas»*.

El portavoz de Ecologistas en

Acción, Carlos Arribas, insiste en que los beneficios de utilizar artificialmente las cavidades de las aguas subterráneas como almacenes de caudales *«depende de muchos factores, pues los acuíferos son medios muy delicados»*. *«No tiene todas las garantías de éxito, pues debe tener en cuenta las características del suelo, e implica un coste energético elevado»*, agrega Colom sobre este método.

El dirigente de AVA Cristóbal Aguado, a su vez, considera que guardar reservas en los acuíferos *«no tiene impacto, evita la evaporación, limita la intrusión marina, mientras facilita el desplazamiento de los caudales»*.

Figs. 6.07. Nota de prensa específica en papel y en formato digital. *Levante de Castellón* 23/03/2001.

3. Dirigidas a las personas involucradas y afectadas por el problema: grupos b.1), b.2) y c.2).

- Facilitar el acceso a la **información**: Creación y mantenimiento de una página web específica sobre el agua como recurso y todos los temas asociados. Además, en la página se crearán mecanismos de participación pública: foros de encuentro, encuestas, sondeos de opinión, etc.
- Campañas divulgativas, como las que se suelen realizar por parte del Ministerio de Medio Ambiente y del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, fomentando **pautas de consumo y ahorro y buenas prácticas agrarias**.



- Campañas específicas de información sobre recarga artificial de acuíferos y temas asociados, con la publicación de folletos divulgativos de fácil comprensión. Algunos títulos propuestos son:
 - El agua como recurso y su importancia.
 - La recarga artificial de acuíferos como técnica para mejorar la actualidad hídrica del país.
 - La recarga artificial de acuíferos como alternativa adicional a las técnicas tradicionales y especiales.
 - La recarga artificial de acuíferos y la restauración de humedales y zonas húmedas degradadas.
 - La mejora cualitativa de las aguascontaminadas gracias a operaciones de recarga artificial de acuíferos
 - Guía de buenas prácticas en actividades agropecuarias.
 - Guía de buenas prácticas en casa.

4. Dirigidas a grupos escolares: grupo c.1).

- Inclusión, dentro del programa curricular, de aspectos relacionados con el recurso agua y temas asociados. Entre los principales aspectos a tratar destacamos:
 - El agua como recurso natural.
 - Los usos y aprovechamientos del agua.
 - Pautas de consumo y ahorro.
 - La recuperación: procesos de depuración y recirculación de aguas residuales.
 - Sistemas de almacenamiento de agua.
 - Procesos de obtención de agua.
 - Técnicas especiales: desalación, recarga artificial de acuíferos y trasvases. Pros y contras.

De todos los aspectos mencionados, los cuatro últimos son los menos tratados en los centros educativos, y es aquí específicamente donde se encuadra la recarga artificial de acuíferos.

El tratamiento de la información debe ser absolutamente técnico, evitando politización alguna, tendencia relativamente habitual en la actualidad hídrica del país.



4. PROPUESTA DE FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

El trabajo realizado no puede ser considerado una tarea concluida, ya que responde a unas condiciones espacio-temporales específicas.

La acelerada evolución de la hidrogeología y el carácter dinámico de las condiciones ambientales nos han sugerido una serie de objetivos que, aunque nos hubiera gustado afrontar, no ha resultado viable. No obstante, gran parte de ellos se mencionan a continuación, bien sea como una lista de tareas pendientes, que quizás en un futuro sean retomadas, o bien como una sugerencia para futuros doctorandos.

4.1. LLUVIA DE IDEAS PARA FUTURAS LÍNEAS DE I + D

4.1.1. Estudio de las analogías y diferencias entre las distintas experiencias a nivel mundial

Una vez recopilada la información necesaria sobre las distintas experiencias, sería procedente contrastar los resultados a nivel mundial y obtener unas recomendaciones operativas específicas. Esta tarea podría ser llevada a cabo al término de las jornadas internacionales sobre AR que organiza la IAHR con carácter cuatrianual.

4.1.2. Criterios aplicados a la obra civil

En consonancia con el punto anterior, resultaría conveniente el diseño de estructuras y cálculos de ingeniería que puedan ser aplicados a la hora de construir estructuras y dispositivos de AR.

4.1.3. Técnicas para la cuantificación de los tiempos de residencia del agua en el acuífero

Uno de los principales problemas que encuentra la recarga artificial inducida (IAR) es simular, mediante un aumento de la superficie de contacto entre el agua y el suelo, la calidad hidroquímica que obtienen las aguas después de un período de residencia en el acuífero indeterminado. La tarea requiere un esfuerzo hidroquímico e ingenieril superior al realizado en el desarrollo de esta tesis doctoral.

El estudio de técnicas de datación servirían para apoyar los estudios relativos al diseño de dispositivos de Recarga artificial inducida (IAR).

4.1.4. Cambio climático y recarga artificial



El futuro de la AR puede estar condicionado por el cambio climático, dado que el principal condicionante para la recarga artificial es contar con excedentes hídricos superficiales que puedan ser almacenados en los acuíferos.

Esta inquietud está en consonancia con la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, cuya prioridad es...

“estabilizar la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero en un nivel que no provoque variaciones no naturales en el clima de la Tierra”.

Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente:
“Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos.”

4.1.5. Estudios de hidroquímica y calidad en la zona no saturada. Procedimientos específicos

La evolución hidroquímica de las aguas en el acuífero tras llevar a cabo operaciones de AR está adquiriendo un grado de desarrollo bastante alto, dado que hay un buen número de científicos desarrollando este aspecto (*Rinck-Pfeiffer, 2002; Dillon et al, 2002; Fryar, 2001; Bouwer, 2001; etc.*).

No obstante, el estudio de la evolución hidroquímica en la ZNS es un aspecto menos conocido, dada la carestía de su aplicación y la dificultad de emplear dispositivos para tal fin (gas chambers, etc).

Este aspecto sin duda constituye una interesante línea de investigación.

4.1.6. Elaboración de modelos de gestión hídrica integrados para abastecimiento y regadío en la Cubeta de Santiuste, considerando la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas

La actual concentración parcelaria llevada a cabo en el “laboratorio experimental” permitirá el diseño y ensayo de parámetros de gestión hídrica a pequeña escala, que puedan ser extrapolados a escalas mayores.

Estos parámetros de gestión estarían enfocados según la procedencia de las aguas (incluyendo las de AR, RBF, ASR o cualquier técnica de AR), la calidad necesaria para los fines previstos, y el uso final de las mismas con criterios de gestión acertados.

4.1.7. Técnicas de teledetección en recarga artificial para obtener una metodología para la investigación de recursos hídricos

Los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y la teledetección se perfilan como técnicas auxiliares de primer orden para la investigación hidrogeológica. Para ello es preciso desarrollar tecnologías específicas aplicadas a la AR, tarea iniciada en este trabajo de investigación en consonancia con la labor llevada a cabo por numerosos autores mencionados en los antecedentes, como Llamas (*en Llamas et al, 2001*).



4.1.8. Enlazar la presencia de flora y fauna en los humedales con la eficiencia de la recarga artificial

El diseño de indicadores medioambientales para los sistemas de AR y la recuperación de humedales hidrodependientes puede ser llevado a cabo mediante la previsión de factores y acciones futuras, o bien, a partir del seguimiento de la evolución de las condiciones ambientales en los casos más específicos.

El estudio de la evolución de los hábitats y de la presencia de flora y fauna constituye una línea de investigación agradable e interesante.

4.1.9. Elaboración de un RDL relativo a la reglamentación técnica para la calidad de las aguas de recarga artificial superficial y profunda

Según se ha mencionado en el apartado 4.2.3 del Bloque 5, el contexto legal actual sugiere la necesidad de normativas que delimiten valores “*umbral*” para la concentración de determinados iones y otros parámetros artificiales en las aguas en función del uso.

En este contexto, y una vez estudiada la calidad hidroquímica de las aguas de recarga natural y artificial, y la repercusión de determinados iones en el medio, se ha presentado un borrador de los límites de aceptabilidad que deben cumplir las aguas empleadas para AR, en consonancia con los trabajos iniciados por Pérez-Paricio, (*en Pérez-Paricio 2000a*), y otros autores.

Una vez establecidos los límites, es previsible su futura incorporación a la legislación hídrica en cualquier ámbito de actuación (local, autonómica, nacional, comunitaria, etc).



Figs. 6.07 a) y b). Presencia de avifauna en humedales relacionados con operaciones de recarga artificial de acuíferos. Adelaida, Sur Australia.

5. CONCLUSIONES DEL BLOQUE

La divulgación de la recarga artificial de acuíferos puede ayudar a conocer mejor esta técnica, y, por tanto, a que pueda ser aplicada en un número de experiencias mayor.

Esta divulgación creemos que debe realizarse a nivel general, es decir, de toda la población, de tal forma que el ciudadano, tal y como promueve la educación ambiental, debe tener un conocimiento crítico de los problemas mediambientales y tener mecanismos a su alcance para desarrollar su participación activa en la resolución de los mismos.

Es la Administración la responsable de facilitar, no sólo los mecanismos de participación, sino de mejorar el nivel de información y formación de las personas implicadas y de la sociedad en general.

Los estudios de AR llevados a cabo en todo el mundo están mejorando el grado de conocimiento a una velocidad vertiginosa, si bien quedan numerosos aspectos pendientes de investigación.

En este Bloque se han sugerido algunas líneas de investigación, a juicio de los autores, tan sustanciosas como necesarias.



CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo se ha realizado con el objetivo de terminar el programa de estudios de Doctorado que promueve e imparte el Departamento de Geodinámica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid.

Los principales aspectos que se han desarrollado son:

- Estudio del estado de la cuestión de la recarga artificial de acuíferos, incluyendo un amplio análisis de los antecedentes existentes y del marco legal.
- Presentación de la zona de estudio, donde se han llevado a cabo las principales experiencias: la Cubeta de Santiuste, y su caracterización hidrogeológica detallada y actualizada, con aportaciones al conocimiento del acuífero de índole geológico, hidrogeológico, climático, hidrológico, etc.
- División de la zona en unidades homogéneas en base a todos los aspectos considerados, empleando herramientas GIS y definiendo el concepto de *Unidad Hidroambiental* (UHA) como unidad de gestión para las operaciones de recarga artificial de acuíferos (AR).
- Caracterización de la calidad de las aguas antes, durante y después de las operaciones de recarga artificial.
- Caracterización de ambientes hidroquímicos y previsiones evolutivas de las aguas de AR tras interaccionar con el acuífero.
- Estudio de valoración de aspectos medioambientales y diseño de prácticas de ingeniería ambiental, inspiradas parcialmente en la legislación vigente, con objeto de caminar hacia el “Buen Estado de las Aguas” y de utilizar la recarga artificial para regenerar los humedales de la zona, los cuales presentan un estado de degradación muy alto en general.
- Elaboración de un corolario de normas técnicas de tipo “Tratamiento de Suelo y Acuífero” (SAT), eminentemente prácticas, aplicables a escenarios análogos que deben ser tenidas en cuenta antes de llevar a cabo labores de recarga artificial superficial. En estas quedan incluidas los criterios de gestión hídrica y los códigos de buenas prácticas.

CONTEXTUALIZACIÓN

- Estudio del estado de la cuestión de la recarga artificial de acuíferos (en adelante AR), incluyendo un amplio análisis de los antecedentes existentes y del marco legal. Se ha concluido en que esta técnica tiene escasa consideración en la legislación hidráulica del país, si bien la plataforma para su aplicación es apropiada.
- El análisis de los antecedentes desprende que hay varias zonas del acuífero escasamente conocidas, ya que gran parte de los estudios previos se han centrado en sectores parciales y temáticas comunes.
- Estudio del medio social del ámbito de aplicación, observando que las mayores tendencias migratorias han coincidido con períodos de sequía.



CONDICIONES DE REFERENCIA

- Se ha procedido a la caracterización hidrogeológica detallada y actualizada de la Cubeta de Santiuste, con aportaciones al conocimiento del acuífero de índole geológico, hidrogeológico, climático, hidrológico, etc. Cabe destacar que el acuífero eólico se ha formado por colmatación de paleocubetas de la era terciaria, orientadas según una directriz tectónica N12O. Entre ellas se transfiere el agua en la actualidad, por relleno y rebosamiento hacia la siguiente, constituyendo un sistema de “cubetas en cascada o en relevo”. Especial importancia tienen la ubicación de los depósitos fluviales fosilizados y los depósitos salinos, que han quedado debidamente posicionados y georreferenciados.
- A partir de las cartografías hidrogeológicas seriadas del acuífero superficial y profundo para situaciones de “aguas altas” y de “aguas bajas” y de los seis perfiles hidrogeológicos para el acuífero superficial, se aprecia que el nivel freático presenta variaciones en su gradiente y anomalías en las líneas de flujo coincidiendo con las cubetas del paleorrelieve (en etapa preoperacional). Este hecho parece ser atribuible al descuelgue hacia niveles inferiores del agua del acuífero superficial a través de perforaciones profundas que intercomunican distintos niveles, a la explotación de sondeos profundos realizados generalmente con estudios previos y perforados en zonas coincidentes con el depocentro de las paleocubetas, o a ambas causas. Tras el inicio de las operaciones de recarga artificial, son estas cubetas las que experimentan las mayores oscilaciones.
- Se ha realizado una cartografía de isovariaciones de la capa freática, que permite detectar zonas con alto riesgo de inundación por efecto de la AR. En vista de la experiencia tras dos ciclos completos, se ha fijado una profundidad de alerta de 1,5 m, inferior a la habitual en acuíferos de estas características (establecida en dos metros).
- Los sistemas de información geográfica y las operaciones de álgebra de mapas se consolidan como herramientas apropiadas para el estudio de terrenos donde se lleven a cabo operaciones de AR. En este caso, se han diferenciado ocho unidades homogéneas, definiendo el concepto de *Unidad Hidroambiental* (UHA) como unidad de gestión. Las UHAs quedan correctamente definidas cuando además de la información citada “se encuentran en algún ordenador”, es decir, tienen un respaldo digital. Los criterios principales para diferenciar las cuatro UHAs se basan en el espesor del acuífero cuaternario, el grado de salinidad y alcalinidad de sus aguas subterráneas, en la presencia de divisorias hidrogeológicas, en sus distintas condiciones ecológicas y por su respuesta diferencial ante las operaciones de recarga artificial.

CALIDAD

- Caracterización de la calidad de las aguas antes, durante y después de las operaciones de AR, así como de ambientes hidroquímicos y previsiones evolutivas de las aguas de AR tras interaccionar con el acuífero.
- El diseño y seguimiento de las redes de control resulta necesario para cualquier modelación cuantitativa y/o cualitativa. El registro histórico debe ser suficientemente extenso en el espacio y tiempo, preferentemente de más de cinco años de duración.
- Las caracterizaciones hidroquímicas han permitido apreciar la presencia de condiciones reductoras en el sector central del acuífero, con propensión a generar incrustaciones que



impermeabilizan al acuífero. También la dilución de nitratos (que presentan mayor concentración en torno a los cinco metros de profundidad), la generación de sulfatos tras la oxidación de la pirita, etc.

- Se han probado dos nuevas isorrelaciones iónicas para estudiar la evolución de las aguas del acuífero con la operaciones de AR: nitratos/oxígeno y hierro total/oxígeno en las aguas subterráneas tras la interacción, con resultados positivos.

- El estudio de pautas de reacción y de balances de masas ha permitido realizar estimaciones relativas a la evolución previsible de las aguas subterráneas tras las operaciones de recarga artificial, si bien queda comprobar si las técnicas y herramientas empleadas han sido las más apropiadas, puesto que, en la etapa actual, tras dos ciclos de AR, no es posible hablar de la bondad de la idoneidad de los códigos de modelación, especialmente el PHREEQC y Netpath.

ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

- Se ha actualizado el inventario de humedales de la zona de estudio e inmediaciones, y caracterizado mediante un sistema propio hasta 85 humedales actuales o indiciales. En general, la mayoría de éstos se encuentran en un grado de conservación muy deficiente y su valor ecosistémico está muy dañado, resultando viable la regeneración de algunos mediante operaciones de AR de tipo inducida.

- Para poder llevar a cabo un seguimiento de la evolución de los humedales se ha planteado una lista de control de impactos ambientales. Con ella se ha diseñado un sistema de 20 indicadores medioambientales para definir y controlar la evolución del sistema a lo largo del tiempo. Se han prediseñado además 15 indicadores de respuesta. Este sistema permite llevar a cabo una evaluación medioambiental bastante exhaustiva, que es complementada con el diseño y aplicación de un polígono de evaluación multicriterio propio, basado en las listas de control, a las que se ha dado un carácter matricial (relacionando factores y procesos) en un histograma de barras horizontales. En consecuencia, los sistemas de rangos-pesos se perfilan como apropiados para la evaluación medioambiental de los sistemas de AR.

TECNOLOGÍAS APLICADAS

- Procedimentalmente, cabe destacar que el seguimiento de las labores de AR al inicio de cada ciclo debe ser controlado *“en continuo”*, con objeto de determinar si la evolución de las aguas y la interacción con los contaminantes generan efectos negativos, acumulativos o sinérgicos indeseables. De cualquier modo la actuación es idónea para caminar en el sentido del *“buen estado de las aguas”* que fija la directiva comunitaria 2000/60/CE como objetivo a alcanzar en el año 2015.

- Algunos de los objetivos considerados han sido el diseño de dispositivos y estructuras para la aplicación de técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT), que permitan mejorar la calidad de las aguas de AR, minimizar las pérdidas por evapotranspiración, prevenir y controlar los procesos colmatantes, funcionar *“en óptimo”* con una climatología extrema (congelación del suelo o avenidas), controlar la entrada de aire al acuífero y el efecto *Lisse*, etc., así como llevar a cabo labores de descolmatación que reduzcan los costes en el transporte, almacenamiento y bombeo, y que además tengan una vida útil suficientemente alta



para obtener una alta rentabilidad. Los sistemas SAT se perfilan, además, como uno de los mecanismos más eficientes para la disminución de la concentración de compuestos orgánicos y nitrogenados de los acuíferos. Se concluye en que la medida más importante para el correcto funcionamiento de los dispositivos de AR es el pretratamiento de las aguas antes de su entrada al sistema.

- Se han diseñado esbozos de nuevos prototipos y dispositivos para operaciones de AR que podrían resultar adecuados en las condiciones actuales; y presentado una propuesta de ubicación dentro de la Cubeta de Santiuste. Estos dispositivos podrían ser utilizados en otros escenarios análogos.

- Dado que las experiencias obtenidas en nuestro “*laboratorio experimental*” se basan exclusivamente en sistemas de AR de acuíferos superficiales, la propuesta se ha centrado en este tipo de dispositivos, considerando los sistemas de recarga profundos de manera colateral. En caso de implantarse en un futuro en la *Cubeta*, será preciso llevar a cabo estudios específicos y nuevas líneas de actuación.

- Dada la alta complejidad de ejecución de las operaciones de AR, resulta preciso contar con plantas piloto o tramos de caz experimentales donde puedan ser ensayadas nuevas tecnologías, dispositivos, etc. La realización de ensayos hidráulicos en el medio deben prolongarse durante al menos 1 ciclo anual de AR, con objeto de determinar un *óptimo* real.

- De acuerdo con Bouwer, 2002, la *regla de oro* en recarga artificial es empezar con cautela, aprender sobre la marcha y expandir las estructuras de acuerdo con lo aprendido de acuerdo con las necesidades.

- Las operaciones de AR requieren contar con un programa de vigilancia y control de cantidad y calidad de las aguas, con adopción de parámetros que permitan una adecuada gestión hídrica, y la elaboración de esquemas de utilización conjunta o coordinada.

- El programa de vigilancia y control de la calidad debe integrar las labores de mantenimiento en un horizonte de 5 a 20 años, donde se aborden los efectos mecánicos, biológicos, químicos y bioquímicos que pueden experimentar variaciones con las fluctuaciones periódicas del nivel freático.

- Las operaciones de AR se perfilan además como técnicas apropiadas para la eliminación o reducción de las fuentes de contaminación. Cada actuación debe representar un objetivo prioritario dentro del enfoque combinado de protección medioambiental integral e incluso global de cada sistema. Para este cometido, las técnicas de telecontrol mediante sondas multiparamétricas se perfilan como efectivas.

- En definitiva, cabe destacar que las experiencias adquiridas hasta la fecha indican que la zona es propicia para la AR superficial, que el método es perfectamente viable y aplicable a otros acuíferos análogos, que las consecuencias son beneficiosas en calidad de las aguas subterráneas, productividad agrícola, impacto ambiental positivo, mejora de humedales degradados, aceptación social, etc., y que cualquier actuación debe tener en cuenta la reglamentación vigente en su ámbito y las costumbres tradicionales de los habitantes de la zona.



- La interacción de impactos medioambientales de signo contrario desembocan en que cualquier planificación de las actuaciones debe tener carácter integral y flexible ante los cambios que, con toda seguridad, se van a producir en el medio.

EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DIVULGACIÓN

- La divulgación de la recarga de acuíferos puede ayudar a conocer mejor esta técnica, y, por tanto, a que pueda ser aplicada en un mayor número de experiencias. Esta divulgación creemos que debe realizarse a nivel general, es decir, de toda la población. La Administración General del Estado es la responsable de facilitar, no sólo los mecanismos de participación pública, sino de mejorar el nivel de información y formación de las personas implicadas y de la sociedad en general, así como promover nuevas experiencias e investigaciones en España.



APÉNDICES

APÉNDICE 1. BIBLIOGRAFÍA.....	1
APÉNDICE 2. GLOSARIO.....	31
APÉNDICE 3. REPORTAJE FOTOGRÁFICO.....	39





APÉNDICE 1. BIBLIOGRAFÍA¹

- Acreman, M. (2000). “*Hidrología de los humedales.*” Medwet nº 10. Conservación de humedales mediterráneos. Tour du Valat, Arlés, Francia.
- AEAS, (1996). “*Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España V Encuesta Nacional de Abastecimiento, Saneamiento y Depuración.*” Publ. Asociación española de Abastecimiento de agua y saneamiento (AEAS), 1998. AGBAR (Sociedad General de Aguas).
- AEMA. (1995). “El Medio Ambiente en Europa” (Informe Dobris). Agencia Europea de Medio Ambiente, 1995.
- AENOR. (1997). “*Calidad del agua.*” Medio Ambiente. Recopilación de normas UNE. Asociación Española de Normalización y Certificación, 1997.
- Aiken, G. (2002). “*Organic Matter in Ground Water.*” US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- Aiken, G. R., and Cotsaris, E., (1995). “*The Influence of Soil Properties and Hydrology on the Nature of Organic Matter in Aquatic Systems and Drinking Water Supplies.*” Journal of the American Water Works Association, vol. 87, pp. 36-45.
- Alba Pastor, C. (2002). “*Usos didácticos de los medios de comunicación en la enseñanza secundaria.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 712 y 724.
- Alcalá del Olmo, L. (1975). “*Estudio edáfico sedimentológico de los arenales de la cuenca del Duero.*” Tesis Doctoral J-11.038. Universidad Complutense (Madrid).
- Allison, G.B., Cook P.G., Barnett S.R., Walker G.R., Jolly I.D., Hughes MW. (1990). “*Land clearance and river salinisation in the Western Murray Basin, Australia.*” Journal of Hydrology 119:1–20.
- Allue, J.L., (1995). “*El cambio climático y los montes españoles.*” Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. Nº 2, 35-64.
- Alonso García-Amilibia, M. (1992). “*Ecología de los humedales de los arenales.*” Curso de humedales de la cuenca del Ebro.
- Alonso, E. (Coordinador) (1996). “*Legal and Administrative framework for mediterranean wetlands.*” Management of Mediterranean Wetlands. Morillo, C. y González, J.L. (editores). MIMAM., Dirección General de Conservación de la Naturaleza (DGCONA), vol. I, pg.13-172.
- Alonso, G. (1986). “*Paleografía del Eoceno Superior-Oligoceno en el SO de la Cuenca del Duero.*” Stvdia Geológica Salmanticensa, XII, 71-92 (1986).
- Alonso, M. (1986). “*Clasificación de los complejos palustres españoles.*” En: “Seminario sobre Bases Científicas para la Gestión de los Humedales Españoles”: 65-78. Real Academia de Ciencias Exactas. Madrid.
- Alonso, M. y Comelles, M. (1988). “*Catálogo limnológico de las zonas húmedas estepáricas de la cuenca del Duero.*” Dirección General de Urbanismo, vivienda y Medio Ambiente. Consejería de Fomento. Junta de Castilla y León.
- Álvarez C., Sánchez Carrillo, M. (1997). “*Contaminación de aguas de arroyos y embalses por arrastre de sedimentos.*” Congreso Nacional de Agricultura de Conservación y Medidas Agroambientales. Burgos (España) 3 y 4 de Diciembre de 1997. 15-21.
- APHA. (1998). “*Standard methods for the examination of water and wastewater.*” Apha, Awwa. Ed Wef. 20th edition, 1998.

¹ Las notaciones empleadas para describir las reseñas bibliográficas escritas en inglés se han realizado respetando su forma de presentación habitual.



- Armayor, J.L., Murillo, J.M. y Martínez, R. (2001). “Factores hidrometeorológicos y determinación de excedentes hídricos potencialmente utilizables en la operaciones de recarga artificial de acuíferos.” Revista Hidropres de tecnología y gestión del agua nº 32. Diciembre de 2001.
- Arthur, J.D., Cowart, J.B. & Dabous, A.A. (2001). “Florida aquifer storage and recovery geochemical study: Year three progress report.” Florida Geological Survey Open File Report 83, 46 p.
- Auqué, L.F. (1993). “Estudio de sistemas geotermales en Aragón. Pautas de especiación y reacción aplicadas a la modelización de sistemas de baja-media entalpía.” Tesis Doctoral. Univ. de Zaragoza, 173 pags. (inérita)
- Ayuga, F. y García Moruno, L. (2001). “Integración de las construcciones e infraestructuras rurales en el paisaje.” Gestión sostenible de paisajes rurales. Técnicas e ingeniería. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Ball, J.W. & Nordstrom, D.K. (1991). “User’s manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters.” U. S. Geological Survey, Open-File Report 91-183; 189 pp.
- Barroso, J.L., Lillo, J., Sahún, B., Tenajas, J.L. (2002). “Caracterización del contenido de Arsénico en las aguas subterráneas de la zona comprendida entre el río Duero, el río Cega y el Sistema Central.” Jornadas “Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco Europea.” Zaragoza. 2002
- Berner, R.A. (1978). “Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions.” American Journal of Science, Vol. 278, nº 3. pg 210-224.
- Bichara, A.F. (1986). “Clogging of recharge wells by suspended solids.” American Society of civil engineers. Journal of irrigation and drainage division, Vol 112, nº 3. pp 210-224.
- Balleau W.P. (1988). “Water approximation and transfer in a general hydrogeologic system.” Natural Resources Journal, 29(2):269–291.
- Ballesteros, F, Rosal, E y Paredes, V (2001). “Técnicas de diversificación de hábitats para favorecer la colonización de fauna en proyectos de restauración de zonas húmedas.” Congreso de restauración de ríos y humedales mediterráneos. CEDEX. Madrid, Octubre de 2001.
- Barbier, E.B., Acreman, M. y Knowler, D. (1997). “Economic evaluation of wetlands: a guide for policy makers and planners.” Ramsar Convention Bureau. Gland, Switzerland: 1-27.
- Bascones, M. (2000). “Evaluación de impacto ambiental del aprovechamiento de aguas subterráneas.” Jornadas Técnicas sobre Aguas subterráneas y abastecimiento urbano. IGME-MIMAM. 267-277.
- Battaglia, F. (2002). “Arsenic et fluor: des traitements peu coûteux.” Hydroplus. Magazine international de l’eau. Nº 120. Février 2002.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L., De Leo, P.C. & de Lozada. D.S. (1998). “Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils in aquifer materials.” Critical Reviews in Environm. Sci. & Technol. Edited by T.J. Logan, CRC Press: 123-191.
- Beaufoy, G. (2000a). “Environmental Impact of Olive Oil Production in the European Union.” European Forum on Nature Conservation and Pastoralism and the Asociación para el Análisis the Reforma de la Política Agro-rural. Final Report. March 2000.
- Beaufoy, G. (2000b). “The Environmental Impact Of Olive Oil. Production In European Union.” Practical Options For Improving The Environmental Impact. Commision Of The Environmental Directorate General.
- Bekesi, G. & McConchie, J. (2002). “The use of aquifer-media characteristics to model vulnerability to contamination, Manawatu region, New Zealand.” Hidrogeology Journal, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Bernúes, M. (1997). “El Convenio de Ramsar. Aplicación y desarrollo en España.” Actas de la Conferencia Internacional para la conservación de las zonas húmedas en una perspectiva norte-sur: la ruta migratoria atlántico oriental: 295-308. Sevilla, 26-29 noviembre 1995. FAT, Madrid.
- Bernúes, M., Torán, T., Custodio, E. y Viñals, M.J. (2001). “Aguas subterráneas y humedales.” Papeles de Aguas Subterráneas (PAS), Serie C. Fundación Marcelino Botín.



- BOCL. (1994). Ley 8/1994, de 24 de junio (Castilla y León), de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales (BOE n.º 174, de 22 de julio de 1994; c.e. BOE n.º 203, de 25 de agosto de 1994).
- BOCL. (1994). Decreto 194/1994 (Castilla y León), de 25 de agosto, por el que se aprueba el Catálogo de Zonas Húmedas y se establece su régimen de protección. Boletín Oficial de Castilla y León (en adelante BOCL.), n.º 168, de 31 de agosto de 1994).
- BOCL. Decreto 209/1995 (Castilla y León), de 5 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental de Castilla y León (BO Castilla y León n.º 196, de 11 de octubre de 1995).
- BOCL. (1998). Ley 5/1998 (Castilla y León), de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 8/1994, de 24 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales de Castilla y León (BOE n.º 197, de 18 de agosto de 1998).
- BOCL. (1998). Decreto 109/1998 (Castilla y León), de 11 de junio, por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero y se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias (BO Castilla y León, n.º 112, de 16 de junio de 1998; c.e. BO Castilla y León, n.º 119, de 25 de junio de 1998).
- BOCL. (1998). Ley 10/1998 (Castilla y León), de 5 de diciembre, de Ordenación del Territorio de la Comunidad de Castilla y León (BO Castilla y León, n.º 236, de 10 de diciembre de 1998; corrección de errores BO Castilla y León n.º 223, de 18 de noviembre de 1999).
- BOCL. (1998). Ley 10/1998 (Castilla y León), de 5 de diciembre, de Ordenación del Territorio de la Comunidad de Castilla y León (BO Castilla y León, n.º 236, de 10 de diciembre de 1998; corrección de errores BO Castilla y León n.º 223, de 18 de noviembre de 1999).
- BOCL. (2002). Decreto 55/2002, de 11 de abril, por el que se aprueba el Plan Forestal de Castilla y León. B.O.C. y L. n.º 73. Miércoles, 17 de abril de 2002.
- BOE. (1985). Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE n.º 189, de 8 de agosto de 1985; corrección de errores BOE n.º 243, de 10 de octubre de 1985).
- BOE. (1986). Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas. BOE. n.º 103 de 30 de abril.
- BOE. (1986). Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE n.º 155, de 30 de junio de 1986).
- BOE. (1986). Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los Ambitos territoriales de los Organismos de Cuenca y de los Planes Hidrológicos.
- Real Decreto 2618/1986, de 24 de diciembre, por el que se aprueban medidas referentes a acuíferos subterráneos al amparo del artículo 56 de la Ley de Aguas (BOE n.º 312, de 30 de diciembre de 1986).
- BOE. (1988). Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas. BOE. n.º 209 de 31 de agosto de 1988.
- BOE. (1988). Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación del Impacto Ambiental (BOE n.º 239, de 5 de octubre de 1988).
- BOE. (1988). Orden de 16 de diciembre de 1988 (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo), relativa a los métodos y frecuencias de análisis o de inspección de las aguas continentales que requieran protección o mejora para el desarrollo de la vida piscícola (BOE n.º 306, de 22 de diciembre de 1988).
- BOE. (1989). Ley 4/1989, de 27 de marzo, de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres. (BOE. n.º 74, de 28 de marzo de 1989).
- BOE. (1990). “Aguas potables de consumo público: Reglamentación Técnico-Sanitaria para abastecimiento y control.” 14-9-1990, RD. 1138/1990
- BOE. (1990). Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público. BOE. n.º 226 de 20 de septiembre.



- BOE. (1991). “Reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de las de bebida envasadas.” 22-7-1991, RD. 1164/1991.
- BOE. (1992). Orden de 24 de septiembre de 1992, por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias, de acuerdo con lo establecido en el Art. 88 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio (BOE n.º 249, de 16 de octubre de 1992).
- BOE. (1995). Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, sobre medidas de regularización y control de vertidos. (BOE n.º 95, de 21 de abril de 1995; rectificación: BOE n.º 114, de 13 de mayo de 1995).
- BOE. (1995). Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE n.º 147, de 20 de junio de 2000).
- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias (BOE n.º 61, de 11 de marzo de 1996).
- BOE. (1998). Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones. BOE. n.º 89 de 14 de abril.
- BOE. (1998). Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. BOE n.º 96 de 22-4-1998.
- BOE. (1998). Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.
- BOE. (1998). Real Decreto-Ley 9/1998, de 28 de agosto, por el que se aprueban y declaran de interés general determinadas obras hidráulicas (BOE n.º 207, de 29 de agosto de 1998).
- BOE. (1999). Ley 46/99, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas. BOE. n.º 298 de 14 de diciembre.
- BOE. (2000). Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE n.º 147, de 20 de junio de 2000).
- BOE. (2000a). Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (BOE n.º 241, de 7 de octubre de 2000).
- BOE. (2000b). Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE n.º 147, de 20 de junio de 2000).
- BOE. (2000c). Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (BOE n.º 241, de 7 de octubre de 2000).
- BOE. (2001). Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE. n.º 111, de 9 de mayo de 2001).
- BOE. (2001). Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. (BOE. n.º 161, de 6 de julio de 2001, corrección de errores BOE. n.º 184, de 5 de julio de 2001).
- BOE. (2001). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE n.º 176, de 24 de julio de 2001; corrección de errores BOE n.º 287, de 30 de noviembre de 2001).
- BOE. (2001). Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. (BOE 20-01-2002).
- BOE. (2002). Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (BOE. n.º 101, de 27 de abril de 2002).
- BOE. (2002). Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (BOE n.º 157, de 2 de julio de 2002).
- BOE. (2002). RD 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSR-02).



- BOE. (2002). “Nueva norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02”. Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, de aprobación de la norma de Construcción sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02). BOE nº 244, de 11 de octubre de 2002.
- BOE. (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE n.º 45, de 21 de febrero de 2003).
- BOE. (2003). Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público.
- BOR. (1981). *"Proyecto de presas pequeñas (Design of small dams)"*. Bureau de Reclamation. Editorial Dossat. Madrid.
- Böhlke, J.K. (2002). “Groundwater recharge and agricultural contamination.” *Hydrogeology Journal* Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Bouwer, H. (1978). *"Groundwater hydrology"*. McGraw-Hill, New York, 480 pp.
- Bouwer, H. (1982). “Design considerations for earth linings for seepage control.” *Ground Water* 20(5):531–537.
- Bouwer, H. (1999). “Artificial recharge of groundwater: systems, design, and management.” In: Mays LW (Ed.) *Hydraulic design handbook*. McGraw-Hill, New York, pp 24.1–24.44
- Bouwer, H. (2002). “Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering.” *Hydrogeology Journal*, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Bouwer, H. & Maddock, T, III (1997). “Making sense of the interaction between groundwater and streamflow: lessons for watermasters and adjudicators.” *Rivers* 6(1):19–31.
- Bouwer, H. & Rice, R.C. (1984). “Hydraulic properties of stony vadose zones.” *Ground Water* 22(6):696–705.
- Bouwer, H. & Idelovitch, E. (1987). “Quality requirements for irrigation with sewage water.” *Journal of Irrigation & Drainage Eng.* 113: 516-535.
- Bouwer, H., & Rice, R.C. (1989). “Effect of water depth in groundwater recharge basins on infiltration.” *Journal. of Irrigation and Drainage Eng.* 115(4): 556-567.
- Bouwer, H. & Rice, R.C. (2001). “Capturing flood waters for artificial recharge of groundwater.” *Proc 10th Biennial Symp Artificial Recharge of Groundwater*, Tucson, Arizona, Arizona Hydrological Society, pp 99–106.
- Brinson, M.M. (1993). “A hydromorphic classification of wet-lands.” US. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Rep WRP-DE-4.
- Brunke, M. & Gonser, T. (1997). “The ecological significance of exchange processes between rivers and ground-water. *Freshwater*.” *Biol* 37:1–33.
- Bubier, J.L. & Moore, T.R. (1994). “An ecological perspective on methane emissions from northern wetlands.” *Tree Mz*, 9 (12): 460-464.
- Buil, B. y Fernández Escalante, A.E. (2001). “Metodología para la determinación de la conexión hidráulica entre humedales y aguas subterráneas mediante criterios hidroquímicos en el ámbito de la provincia de Jaén.” *Jornadas sobre presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. IGME. Linares (Jaén). Septiembre de 2001.
- Buil, B. (2001). “Estudio geoquímico de los procesos de interacción agua-roca sobre sistemas geotermales de aguas alcalinas en los granitoides del complejo plutónico de la Maladeta (Huesca-Lérida).” Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, 2002.
- Bull, W.D. (1977). “The aluvial fans environment.” *Prog. Phys. Geogr. Jour.* 22. pp 222-270.
- Bull, W.D. & McFadden, L.D. (1977). “Tectonic geomorphology North and South of the Garlock fault.” En: *geomorphology in arid regions*. (D.O. Doehring edit.). Publ. Geomorphology State Univ. New York at Birghantom, pp. 115-138.
- Burnett, A.W. & Schumm, S.A. (1983). “Alluvial river response to neotectonic deformation in Louisiana and Mississippi.” *Science magazine*, n 222, pp 49-51.
- Byl, T.B., Hileman, G.H., Williams, S.D., Metge, D.W. & Harvey, R.W. (2002). “Microbial Strategies for Degradation of Organic Contaminants in Karst.” *US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings*, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.



- Cano-Manuel, J. y González Ayestarán, R. (2000). *"Las acequias de Sierra Nevada. Base de datos de las principales acequias de Sierra Nevada"*. Parque nacional de sierra Nevada. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Catalán, J. (1981). *"Química del agua."* Ed. Blume. Madrid.
- Chadha, D.K. (1999). *"A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data"*. Hydrogeology Journal. Volume 7, Number 5. Springer-Verlag Heidelberg. October 1999.
- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. (2001). *"Sexto Programa de acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente."* Propuesta de Decisión del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece el programa comunitario de acción en materia de medio ambiente para 2001-2010. "Medio ambiente 2010: El futuro está en nuestras manos." Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité económico y social y al Comité de las regiones. CCE, Bruselas, 24 de enero de 2001.
- CEDEX. (1996). *"Estudio de la hidrología isotópica e hidroquímica del acuífero de Los Arenales."* Documento interno no publicado.
- Calderón, S. (1895). *"Origen de la sal común y de los sulfatos de los terrenos terciarios lacustres de la Península."* An. Hist. Nat., 24: 337-362.
- Carrera, J. (1997). *"Observación y medidas de la recarga (descarga) a partir de aguas superficiales y conducciones, transferencias y fugas."* La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. Asoc. Intern. Hidrogeólogos-Grupo Español/Instituto Tecnológico Geominero de España (e.a. ITGE). Madrid: pg. 229-245.
- Casado, S. & Montes, C. (1995). *"Guía de los lagos y humedales de España."* J.M. Reyero (Editor). Ed. Ecosistemas. Madrid.
- Castany, G. (1967). *"Prospection et exploitation des eaux souterraines."* Ed. Dunod (trad. castellana: Ed. Omega).
- Chadha, D.K. (1999). *"A proposed new diagram for geochemical clasification of natural waters and interpretation of chemical data."* Hydrogeology Journal nº 7: 431-439. 1999.
- Chebotarev, I.I. (1955). *"Metamorphism of natural waters in the crust of Wathering."* Geochim. Cosmochim. Acta 8.
- Chiang, W. & Kinzelbach, W. (2001). *"3D-Groundwater Modeling With Pmwin."* Springer Verlag.
- Christen, E.W, Prasad, A & Khan, S. (2000). *"Using piezometric data to determine area-wide annual net recharge: Analysis for the Coleambally Irrigation Area."* Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (e.a. CSIRO) Land and Water Griffith NSW 2680. Technical Report 39/00, July 2000. 17 pp. Australia.
- Christen, E.W, Prasad, A & Khan, S. (2001). *"Spatial Analysis of shallow groundwater pumping for salinity control and potential conjunctive use: A case study of the Coleambally Irrigation Area."* CSIRO Land and Water PMB nº 3. Griffith NSW 2680. Technical Report 40/00, July 2001. 27 pp. Australia.
- COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS DE CENTRO Y CANARIAS. (1996). *"Manual de Prácticas y Actuaciones agroambientales"*. Serie Técnica. Editorial Agrícola España, S.A. Ediciones Mundi-prensa.
- Collins, W.D. (1929). "Graphic representation of water analysis." Ind. and ing. chem. vol. 15. 1929
- CONAMA (2000). *"Integración de aguas subterráneas en la gestión hídrica."* V Congreso Nacional de Medio Ambiente. Ilustre Colegio Oficial de Físicos. Madrid.
- Confederación Hidrográfica del Duero (2001). *"Informe de actualización del estudio 5/2001 de la DGOHCA y propuesta de normas de otorgamiento de concesiones de aguas subterráneas de las unidades hidrogeológicas 02.17 Región de Los Arenales y 02.13 Páramo de Cuéllar."* Informe interno no publicado.
- CMA. (2001). *"Restauración de las reservas naturales de Laguna Honda y Laguna del Chinche. T.M. de Alcaudete (Jaén)."* Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía-Tragsatec. Informe técnico no publicado.
- CONVENCION DE RAMSAR (1996). *"Plan Estratégico. Objetivos y acciones 1997-2002."* En: Actas 6ª Reunión de la Conferencia de las partes Contratantes, Brisbane (Australia).



- Cook PG, Walker G.R., Jolly, I.D. (1989). “*Spatial variability of groundwater recharge in a semi-arid region.*” Journal of Hydrology 111:195–212.
- Cook, M.C. & Moncaster, S. (1998). “*ASR feasibility testing of the semi-confined Cretaceous Chalk aquifer of South Essex, England.*” Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. (ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- Cook, P. (1999). “*Environmental Flows Report. Howard River Basin.*” CGS Bulletin. Nº 13. February 1999.
- Corrales, I. (1979). “*El Mioceno al sur del río Duero (Sector Occidental). 1ª Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero.*” Parte II. IGME.
- Corrales, I. (1982). “*Las Facies Miocenas del Sector Sur de la Cuenca del Duero.*” IGME.
- Corrales, I., Carballeira, J., Corrochano, A., Pol, C. y Armenteros, I. (1979). “*Las Facies Miocenas del Sector Sur de la Cuenca del Duero.*” 1ª Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero. Parte I. IGME.
- Coudrain-Ribstein, A., Pratx, B., Talbi, A. & Jusserand, C. (1998). “*L'évaporation des nappes phréatiques sous climat aride est-elle indépendante de la nature du sol.*” C R Acad Sci Paris Sci Terre Planèt 326:159–165.
- Cozzarelli, I. (2002). “*Impact of Organic Contaminants on the Evolution of Aquifer Geochemistry.*” US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- Cruces, J, Martínez, L (2000). “*La Mancha Húmeda. Explotación intensiva de las aguas subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana.*” Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas Fundación Marcelino Botín. Uso intensivo de las aguas subterráneas, aspectos éticos, tecnológicos y económicos. Serie A, Nº3
- CSIRO. (2002). “*Draft code of practise for aquifer storage and recovery of surface water in South Australia.*” CSIRO Land and Water. Australian groundwater technologies. Environment Protection Authority. September, 2002.
- Cushing, R., David G. Pyne, R & Wilkes, D.R. (2003). “*Aquifer Storage and Recharge Pretreatment: Synergies of Bank Filtration, Ozonation, and Ultraviolet Disinfection.*” Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Custodio, E y Llamas, M.R. (1983). “*Hidrología Subterránea.*” Ed Omega. Barcelona. 2 vols: 1-2450.
- Custodio, E. (1981). “*Estudio de la recarga artificial con aguas residuales tratadas en el acuífero cautivo del Delta del Besós, mediante las curvas características del pozo.*” IV Asamblea General de Geodesia y Geofísica (Zaragoza, Spain. 1981). Pg 1643-1673.
- Custodio, E. (1986). “*Recarga artificial de acuíferos.*” Boletín de Informaciones y Estudios, nº 45. Servicio Geológico, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). Madrid. 148 pg.
- Custodio, E. (1987). “*Peculiaridades de la Hidrología de los complejos palustres españoles.*” Bases científicas para la protección de los Humedales en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, pg. 43-64.
- Custodio, E. (2000a). “*The complex concept of overexploited aquifer.*” Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas, Serie A-2: Uso Intensivo de las Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín. Madrid. pg. 1-62.
- Custodio, E. (2000b). “*Groundwater-dependent wetlands.*” Acta Geológica Hungarica, 43 (2): 173-202.
- Custodio, E. (2002). “*Aquifer overexploitation: what does it mean?.*” Hidrogeology Journal, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Dabrio, C. (1984). “*Sedimentación en costas siliciclásticas.*” Ciclo de seminarios de sedimentología. IGME. Vol 1.
- De Honge, H.J., Kortleve, M.W. & Frapporti, G. (2002). “*Sustainable use of aquifer for artificial recharge in South-Holland.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed).



- Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Delin, G.N. & Landon, M.K.. (2002). “*Effects of topography on the transport of agricultural chemicals to groundwater in a sand-plain setting.*” Hydrogeology Journal Vol. 10 n° 4:443-454. August 2002. AIH-Springer.
 - De los Cobos, G. (2002). “*The aquifer recharge system of Geneva, Switzerland: a 20 year successful experience.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
 - Del Barrio, V. y Fernández Pérez, L. (2001). “*Incidencia hidrogeológica de una explotación de turba en el acuífero aluvial del arroyo Mesegar, (Valladolid).*” VII Simposio de hidrogeología. Tomo XXIII. Gestión del agua y uso sostenible. Murcia. IGME.-A.I.H.
 - DGCONA. (1999). “*Management of the Mediterranean Wetlands.*” MIMAM-DGCONA.
 - DOCE. (1976). Directiva del Consejo 76/464 CEE, de 4 de mayo de 1976, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad [(Diario Oficial de las Comunidades Europeas (e.a. DOCE.) n.º L 129, de 18 de mayo de 1976].
 - DOCE. (1979). Directiva del Consejo 80/68/CEE, de 17 de diciembre de 1979, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas (DOCE n.º L 20, de 26 de enero de 1980).
 - DOCE. (1985). Directiva del Consejo 85/337/CEE, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (DOCE n.º L 175, de 5 de julio de 1985). Modificada por la Directiva 97/11/CE del Consejo de 3 de marzo de 1997 (DOCE n.º L 73 de 14 de marzo de 1997).
 - DOCE (1987). “*Acta Única Europea. Tratado constitutivo de la Comunidad Europea*” (AUE). DO L 169 de 29.6.1987.
 - DOCE. Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. (DOCE.) n.º L 206, de 22 de julio de 1992).
 - DOCE. (1996). Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (DOCE n.º L 257, de 10 de octubre de 1996).
 - DOCE. (1997). Directiva 97/11/CE que modifica la directiva 85/337/CEE.
 - DOCE. (1997). Directiva 97/62/CE de 27 de Octubre de 1997 por la que se adapta al progreso científico y técnico la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de fauna y flora silvestres. (DOCE, L305, de 8 de noviembre de 1997).
 - DOCE. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DOCE n.º L 327, de 22 de diciembre de 2000).
 - DOCE. (2001). Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente (DOCE n.º L 197, de 21 de julio de 2001).
 - DOCE. (2001). Decisión 2455/2001/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de noviembre de 2001, por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE (DOCE. n° L 331, de 15.12.01).
 - Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I. C. & Zwahlen, F. (2002). “*Main concepts of the "European approach" to Karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping.*” Hydrogeology Journal, volume 10, n° 2, April 2002.
 - David G. Pyne, R. (1995). “*Groundwater recharge and wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery.*” Lewis Publishers. CRC Press. Boca Ratón, Florida, USA. 376 pp.
 - David G. Pyne, R. (1998). “*Aquifer storage recovery: Recent developments in the United States.*” Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.



- David G. Pyne, R. (2002). “*Water quality changes during aquifer storage recovery (ASR).*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Davis, B.A.S. (1994). “*Paleolimnology and Holocene environmental change from endorheic lakes in the Ebro-Basin, North-East Spain.*” PhD Tesis. University of Newcastle Upon Tyne.
- Davis, T.J., Blasco, D. y Carbonell, M. (1996). “*Manual de la Convención de Ramsar. Una guía a la Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional.*” Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- Dawes, W., Stauffacher, M. & Walker, G.R. (2000). “*Calibration and modeling of groundwater processes in the Liverpool Plains.*” CSIRO Land and Water. Technical Report 5/00. February 2000. Australia.
- De Bries, J. & Simmers, I. (2002). “*Groundwater recharge: an overview of processes and challenges.*” Hydrogeology Journal Vol 10, nº 1. FEB 2002. AIH-SPRINGER.
- De La Orden, J.A., López-Geta, J.A. y Murillo, J.M. (2003). “*Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos.*” Boletín Geológico y Minero. Volumen 114, nº 2, abril-junio de 2003. I.G.M.E.- M.C.T.
- De Meers, J. (1992). “*La explotación del territorio y su relación con los humedales.*” Curso de humedales de la cuenca del Duero. Hábitats de descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Los Arenales. Actuaciones para su protección. Biblioteca de Educación Ambiental. Sección C: documentación técnica de medio-ambiente. Junta de Castilla y León.
- Delmolino, A. (2002). “*Des nitrates toujours aussi indigestes.*” Hydroplus. Magazine international de l’eau. Nº 120. Février 2002.
- DGCONA (1996). “*Management of the Mediterranean Wetlands*” MIMAM- Dirección General de Conservación de la Naturaleza (e.a. DGCONA).
- DGCONA (1999). “*Plan Estratégico Español para la Conservación y Uso Racional de los Humedales.*” Octubre 1999. MAPA-DGCONA.
- Díaz-Marta, M. (1989). “*Esquema histórico de la ingeniería y la gestión del agua en España.*” Revista de OP nº 13, España y el Agua I. Otoño 1989 pg.8-23.
- Dillon, P.J. & Liggett, J.A. (1983). “*An ephemeral stream-aquifer interaction model.*” Water Resour Res 19(3):621–626.
- Dillon, P.J. (1996). “*Economics of ASR: System and users perspective.*” Aquifer Storage and Recovery. Centre for Groundwater Studies. Adelaide, Australia. 1-2 october, 1996.
- Dillon, P., & Pavelic, P. (1996a). “*Issues in artificial recharge and recharge enhancement: A case study development of water quality guidelines for injection of reclaimed water.*” Invited paper. Proc. Workshop on Groundwater-surface Water Issues in Arid and Semi-Arid Areas. Pretoria, South Africa, Sept. 1996.
- Dillon, P.J. & Pavelic, P. (1996b). “*Guidelines on the quality stormwater and treated wastewater for injection into aquifers for storage and reuse.*” Centre for Groundwater Studies (CGS). Research Report nº 109. July, 1996. Australia.
- Dillon, P.J., Pavelic, P., Rattray, K., Schultz, M., Winkler, I.G., Ragusa, S.R., Stanger, G., and Armstrong, D. (1995). “*The quality of water in the upper Quaternary aquifer at three selected sites in the Adelaide metropolitan area.*” Groundwater watch: a study involving South Australian High School students. Centre for Groundwater Studies. Report No 60, Nov 1995.
- Dillon, P. J., Sibenaler, X and Harris, B. (1996a). “*Groundwater recharge and re-use.*” Proc. Inaugural Conf. on Groundwater and Land-Use Planning. Centre for Groundwater Studies, Fremantle, Sept. 1996, pp149-155.
- Dillon, P.J., Barry, K. & Anda, M. (1996b). “*Saline groundwater versus a wetland: flushed with success.*” Notes of the MFP Wetland Workshop, Grosvenor Hotel, Adelaide, 7 November, 1996. MFP Australia.
- Dillon, P., and Pavelic, P. (1998). “*Environmental guidelines for aquifer storage and recovery: Australian experience.*” Third Int. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR). 21-25 September 1998. In: J.H. Peters et al., Balkema, Amsterdam, the Netherlands.



- Dillon, P.J., Toze, S., Pavelic, P., Ragusa, S., Martin, R., Gerges, N. y Rinck-Pfeiffer, S. (1999). "Addressing the risks in storing recycled water in an Australian aquifer." Actas del 9º Simposium Biannual de Recarga Artificial de Acuíferos." Tempe, Arizona (USA). 125-134.
- Dillon, P.J. (2001). "Review of Research on Plantation Forest Water requirements in Relation to Groundwater Resources in the Southeast of South Australia for Department for Water Resources, South Australia." Centre for Groundwater Studies Report No 99, May 2001. Australia.
- Dim, J.R., Sakura, Y., Fukami, H. & Miykoshi, A. (2002). "Spatial characteristics of groundwater temperature in the Ishikari Lowland, Hokkaido, northern Japan: analytical and numerical applications." Hidrogeology Journal, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Dirección General de Carreteras-C.E.D.E.X.. (1999). "Máximas lluvias diarias en la España peninsular." Serie Monografías. Madrid.
- Domenico, P.A. (1972). "Concepts and models in groundwater hydrology." McGraw Hill, New York.
- Domenico, P.A. y Schwartz F.W. (1990). "Physical and chemical hydrogeology." John Wiley & Sons. New York.
- Dourojeanni, A. (2000). "Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable." ONU-CEPAL-ECLAC. División de recursos naturales e infraestructura. Chile, 2000.
- Dowling, T., Walker, G., Jolly, I., Christen, E. & Murray, E. (2000). "Testing a Gis-based suitability approach for regional planning." On-farm and community scale salt disposal basins on the riverine plain. CRC for catchment hydrology. CSIRO Land and Water. Murray-Darling basin commission. CRC for catchment hydrology report 00/2. CSIRO land and water technical report 3/00. 82 pp. March, 2000. Australia.
- Dragan, J. (1988). "Soil chemistry of hazardous materials." Hazardous materials Control Research Institute. Silver Springs, MD, 1988.
- Drever, J.I. (1982). "The Geochemistry of Natural Waters." Prentice Hall, New Jersey, 437 pp.
- Dugan, P.J. (1990). "Wetland Conservation: a Review of Current Issues and Required Action." IUCN, Gland, Switzerland.
- Duran, J.J. (1995). "Las aguas subterráneas y el medio ambiente." Jornadas sobre las Aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica. Análisis y propuestas sobre el Libro Blanco. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (e.a. MOPTMA.)/ Ministerio de Industria y Energía (e.a. MINER)/Club del Agua Subterránea. Madrid.
- Durov, S.A. (1948). "Natural waters and graphic representation of their composition." Doklady Akad. Nauk. SSSR. vol. 59. 1948.
- EOI. (2000). "Prontuario de gestión medioambiental." Escuela de Organización medioambiental-SEPI. Madrid, 2000.
- Ellis, T., Bessard, Y. & Brophy, J. (2001). "Estimating recharge from Alley farm." Applying the ENOR model within the Murray Darling basin. CSIRO Land and Water. Technical report 4/01, April, 2001. Australia.
- Elvira, B. (1998). "El declive de los peces fluviales en España." Ecosistemas, 22, 66-71.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2002). "Des nitrates toujours aussi indigestes." Hidroplus, nº 120. Février 2002.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1997). Integrated Risk Information System [Internet]. En: <http://www.epa.gov>.
- EWRI-ASCE. (2001a). "Water Resources Planning & Management." World Water Resources & Environmental Resources Congress. Orlando Florida. May 20-24, 2001. EURI-ASCE. American society of civil engineers. ASCE/EWRI Standards Committee for Artificial Recharge.
- EWRI-ASCE. (2001b). "Standard guidelines for artificial recharge of ground water." American Society of Civil Engineers. Standard nº 34-01.
- FAO. (1987). "La calidad del agua en la agricultura." Estudio FAO riego y drenaje, nº 29. Roma, 1987.
- FAO. (1998). "World reference base for soil resources." World soil resources report 84. Rome.



- Fernández Escalante, A.E., (1999). “*El agua de riego. Procedencia, calidad, aguas depuradas.*” Jornadas Técnicas sobre equipos de filtrado y fertirrigación. Regadíos Centro Nacional de Tecnología del Regadío (CENTER). Madrid.
- Fernández Escalante, A.E., (2001a). “*Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.*” Jornadas sobre investigación, captación y gestión de aguas subterráneas en España. CENTER, Madrid. MAPA.
- Fernández Escalante, A.E., (2001b). “*Caracterización química de las aguas subterráneas. Sistemas de representación de las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas.*” Apuntes del Curso de Hidrogeología Noel Llopis. Tema 8. Sin publicar.
- Fernández Escalante, A.E., (2002a). “*La recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia) Estudio de las condiciones de referencia, funcionamiento hidrogeológico y aspectos medioambientales relacionados.*” Trabajo de aspiración a la Diplomatura de Estudios Avanzados. Dpto de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Trabajo no publicado.
- Fernández Escalante, A.E., (2002b). “*Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.*” Jornadas sobre testificación, gestión y aprovechamiento de aguas subterráneas. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER)- Dirección General de Desarrollo Rural (MAPA.). Madrid.
- Fernández Escalante, A.E., y Cordero, R. (2002). “*Los espacios naturales protegidos frente a la Directiva Marco del agua. comentarios y proposiciones acerca de los estudios de impacto ambiental en los mismos.*” Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM.-CY-II.
- Fernández Escalante, A.E., & López, J. (2002a). “*Contribution to the hydrogeological knowledge of an artificial recharge area based on hydrochemical investigation. Los Arenales site, Duero basin, (Spain).*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). *Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002.* Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Fernández Escalante, A.E., & López, J. (2002b). “*Hydrogeological studies preceding artificial recharge of Los Arenales aquifer, Duero basin (Spain).*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). *Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002.* Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Fernández Escalante, A.E., Buil, B. y Martínez, J. (2001). “*Caracterización hidroquímica del agua de las lagunas de Alcaudete (Jaén), con objeto de determinar la relación entre las aguas subterráneas y el quimismo lagunar.*” Jornadas sobre presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. IGME. Linares (Jaén). Septiembre de 2001.
- Fernández Rubio, R. (2001). “*Las aguas subterráneas en el Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional.*” Club Español del Medio Ambiente. Revista Tecnoambiente Nº 106 Año XI.
- Fetter, C.W. (1994). “*Applied Hydrogeology.*” Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Fitzpatrick, R.W., Bruce, D.A., Davies, P.J., Spouncer, L.R., Merry, R.H., Fritsch, E. & Matchmetz, D. (1999). “*Soil Landscape Quality Assessment at Catchment and Regional Scale.*” Mt lofty ranges pilot project. Final technical report. CSIRO Land and Water. Technical Report 28/99, July 1999. 69 pp. Australia.
- Flint A.L., Flint L.E., Bodvarsson G.S., Kwicklis E.M., Fabryka-Martin, J.T. (2001). “*Evolution of the conceptual model of vadose zone hydrology for Yucca Mountain.*” J Hydrology 247(1–2):1–30.
- Flint, A.L., Flint, L.E., Kwicklis, E.M., Fabryka-Martin, J.T & Bodvarsson, G. (2002). “*Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA: comparison of methods.*” Hydrogeology Journal Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Florín, M., Maltchik, L., Mollá, S., Balsa, J. & Montes, C. (1983). “*Relaciones conductividad-concentración iónica en las aguas de las lagunas salinas españolas.*” Actas del VI Congreso Español de Limnología, p. 83-90, Granada. Septiembre 1993.
- Foster, S. (1994). “*Managing land to protect groundwater sources: The English experience.*” Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos.” Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, Diciembre 1994.



- Fournier, R. O. (1981). “*Application of Water Chemistry to Geothermal Exploration and Reservoir Engineering.*” In: L. Rybach & L. J. P. Muffler (Eds.), *Geothermal Systems: Principles and Case Histories* (pp. 109-143). New York: Wiley.
- Fournier, R.O. & Potter, R.W. (1982). “*An equation correlating the solubility of quartz in water from 25 to 900°C at pressures up to 10000 bars.*” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46:1969–1973, 1982.
- Fox, P. (2002). “*Soil Aquifer treatment: an assesment of sustainability.*” *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). *Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Freeze, R.A, Witherspoon P.A. (1967). “*Theoretical analysis of regional groundwater flow, II: effect of water table configuration and subsurface permeability variations.*” *Water Resour Res* 3(2):623–634.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). “*Groundwater.*” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
- Friends, A. & Raport, D. (1979). “*Towards a comprehensive framework for environment statistics: stress-response approach.*” Ottawa, Canadá: Statistics Canada.
- Fritz, B., Sievers, J, Eichhorn, S & Pekdeger, A. (2002). “*Geochemical and hydraulic investigations of river sediments in a bank filtration system.*” *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). *Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Fryar, A. (2001). “*Groundwater recharge and chemical evolution in the Southern High Plains of Texas (USA) .*” *Hydrogeology Journal*. Vol 9, nº 6. Diciembre de 2001.
- Frycklund, C. (1998). “*Artificial Recharge of groundwater for public water supply. Potential and limitations in Boreal conditions.*” Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engng., Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm.
- Galán de Frutos, L.A. (1995). “*Estudio para la ubicación del vertedero controlado Municipal de los residuos inertes y plan para la recuperación ambiental del área “Cantera Pinar Nuevo.”* Informe técnico sin publicar elaborado para el Exmo Ayuntamiento de Coca. Segovia.
- Galán, R., López, F., Martínez, J., Macías, C., Galán, G. y Fdez. Escalante, A.E. (2001a). “*Recarga artificial del acuífero de los Arenales en la comarca de “El Carracillo” (Segovia). Soporte físico.*” VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Galán, R, Fdez Escalante, A.E. y Martínez, J. (2001b). “*Contribuciones al estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero de la Cubeta de Santiuste. (Segovia).*” VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Gale, I. (2001). “*ASR - UK: Elucidating the hydrogeological issues associated with Aquifer Storage and Recovery in the UK.*” *Water Resources-Groundwater WR/22*. BGS Report No. CR/02/156/N. British Geological Survey (Natural Environment Research Council). Thames Water Utilities. Plc. London.
- Gale, I. (2002). “*Augmenting Groundwater Resources by Artificial Recharge (AGRAR).*” A project funded by the British Department for International Development (DFID) and led by the British Geological Survey (BGS) in collaboration with other organisations. Duration: July 2002 to July 2005.
- Gandullo, J.M., Sánchez Palomares, O. (1994). “*Estaciones ecológicas de los pinares españoles.*” Colección Técnica del Instituto para la Conservación de la Naturaleza (e.a. ICONA). MAPA. Madrid. 188 pg.
- García-Hernán, O. (1997). “*Investigaciones y ensayos experimentales de la recarga artificial de acuíferos detríticos con baja permeabilidad. Lebrija (Sevilla).*” Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- García Vallinas, E. (2002). “*Las finalidades educativas.*” Programación y evaluación curricular. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 84.
- Garcia-Amilibia, M. A. (1992). “*Ecología de los humedales de Los Arenales.*” Curso de humedales de la cuenca del Duero. Hábitats de descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Los Arenales.



- Actuaciones para su protección. Biblioteca de Educación Ambiental. Sección C: documentación técnica de Medio-Ambiente. Junta de Castilla y León.
- García Rodríguez, M. (1996). "Hidrogeología de las Tablas de Daimiel y de los Ojos del Guadiana. Bases hidrogeológicas para una clasificación funcional de humedales ribereños." Servicio de Publicaciones Universidad Complutense de Madrid.
 - García Rodríguez, M. (2003). "*Clasificación funcional de humedales ribereños.*" Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen I, año 2003, separata. Diciembre, 2003. Universidad Alfonso X El Sabio. Escuela Politécnica Superior. Villanueva de la Cañada (Madrid).
 - Garrido-Megias, A. (1973-82). "*Estudio geológico y relación entre la tectónica y sedimentación del Secundario y Terciario de la vertiente meridional pirenaica en la zona central (provincias de Huesca y Lérida).*" Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 395 pg.
 - Gogolev, M. & Ostrander, M. (2000). "*Estimating groundwater recharge with Visual HELP model*" Proceedings of the IAH 2000 Congress in South Africa, November 2000.
 - Golden Software (2002). "*Surfer 8.0 User's Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers.*" Golden Software, Inc. Colorado, USA.
 - Gómez Orea, D. (1999). "*Evaluación del impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental.*" Coedición Ediciones Mundi-prensa-Editorial agrícola española, S.A. Madrid, 1999.
 - Gómez, V. y García, J.I. (2003). "*Estudio de las implicaciones ambientales de las actuaciones de bombeo-recarga artificial sobre las masas forestales de la zona de "El Carracillo, (Segovia).*" Informe no publicado. MAPA., Madrid, 2003.
 - Gomis, C. (1967). "*Representación gráfica del análisis químico de un agua.*" Documentos de investigación. hidrológica. nº3, pp. 35-62. Barcelona 1966. (1967).
 - González-Bernáldez, F. (1988). "*Typology of wetlands and evaluation of the resources they represent.*" Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions. Agencia del Medio Ambiente. Sevilla: 7-36.
 - González Bernáldez, F. (1989). "*Ecosistemas áridos y endorreicos españoles.*" En: Zonas áridas en España: 223-238. Real Academia de Ciencias de Madrid.
 - González Bernáldez, F. (1992a). "*Los paisajes del agua: terminología popular de los humedales.*" J. M. Reyero Editor, Madrid.
 - González-Bernáldez, F. (1992b). "*Ecological aspects of wet-land/groundwater relationships in Spain.*" Limnética. Madrid. 8: 11-26.
 - González Bernáldez, F. (1992c). "*Valores y funciones de los ecosistemas de descarga de acuíferos en Los Arenales.*" Curso de humedales de la cuenca del Duero. Hábitats de descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Los Arenales. Actuaciones para su protección. Biblioteca de Educación Ambiental. Sección C: documentación técnica de medio-ambiente. Junta de Castilla y León.
 - Goy, J.L; Simon, J.L. y Zazo, P. (1988). "*Criterios geomorfológicos aplicados a neotectónica.*" Sociedad española de geomorfología. Monografía 2, pg 4-27.
 - Green WH, Ampt GA. (1911). "*Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils.*" J Agric Sci 4:1-24.
 - Griffioen, J., Lourens, A.L., Venema, P, te Stroet, C.B.M. & Minnema, B (1998). "*An integrated model for predicting and assessing the development of groundwater quality.*" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. *et al.*(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
 - Grischek, T., Madeleidt, W. & Nestler, W. (2002a). "*River bed specifics and their effect on bank filtration efficiency.*" Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
 - Grischek, T., Schoenheinz, D. Worch, E. & Hiscock, K. (2002b). "*Bank filtration in europe- an overview of aquifer conditions and hydraulic controls.*" Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial



- Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E. & Turner, A.K. (2002). "Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data." Hydrogeology Journal Vol. 10 n° 4:455-474. August 2002. AIH-Springer.
 - Haase, P., Pugnaire, F.I., Fernández, E.M., Puigdefábregas, J., Clark, S.C., Incoll, L.D. (1996). "An investigation of rooting depth of the semiarid shrub *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss by labelling of ground water with a chemical tracer." Journal Hydrology 177:23-31 studies.
 - Haeffner, H., Detay, M. & Bersillon, J.L. (1998). "Sustainable groundwater management using artificial recharge in Paris region." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
 - Hammer, D.A. (1996). "Creating freshwater wetlands." Second Edition. CRC Lewis Publ. London. 406 pp.
 - Hammer, M.J. & Hammer, J. (1986). "Water and wastewater technology." Prentice Hall International, Inc 1986.
 - Hammer, U.T. (1986). "Saline lakes ecosystems of the world." Junk Publ. 616 pp. Saline Lake Ecosystems of the World Monographiae Biologicae Vol 59
 - Hantke, H (1983). "Der Sickerschlitzenbau. Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, und Rohrleitungsbau" (BBR): 34(6):207-208.
 - Harris, G. (2002). "Simple rules underlie the complex and non-linear dynamics of terrestrial and aquatic ecosystems: implication for catchments biogeochemistry and modelling." CSIRO Land and Water. Technical Report n° 11/02. April, 2002. 44 pp. Australia.
 - Haas, D.L., Robison, M.J., & Wilkes, D.R. (2003). "Bridging Research and Practical Design Applications." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
 - Hayes, M. (1999). "Drought indices." National Drought mitigation Center. University of Nebraska-Lincoln. (<http://www.enso.unl.edu/ndmc>). 9 pgs.
 - Healy, R. & Cook, P. (2002). "Using groundwater levels to estimate recharge." Hydrogeology Journal Vol 10, n° 1. Feb 2002. AIH-Springer.
 - Heilweil, V. & Solomon, K. (2002). "Permeability Reduction Caused by Trapped Gas: Field-Scale Observations and Quantification with a dissolved-gas tracer during a ponded infiltration experiment." US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
 - Hem, J.D. (1985). "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water." US. Geological Survey Water supply, paper 2254.
 - Herczeb, A & Leaney, W. (2002). "Groundwater flow systems and recharge in the McLaren Vale prescribed wells area." CSIRO Land and Water . Technical Report n° 10/02. March, 2002. 38 pp. Australia.
 - Hernández García, M. E. y Fernández Ruiz, L. (2002). "Presencia de arsénico de origen natural en las aguas subterráneas del acuífero detrítico del Terciario de Madrid." Boletín Geológico y Minero, 113 (2): 119-130.
 - Hernández Pacheco, E. (1915). "Geología y paleontología del Mioceno de Palencia." Trabajo Com. Juv. De paleontología y prehistoria. N° 5, pg 255-267.
 - Hernández Pacheco, F. (1923). "Las arenas voladoras de la provincia de Segovia." Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. T 22. pg. 211-216.
 - Hernández Pacheco, F. (1969). "Proceso formativo y época de la Sierra de Guadarrama." Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. T 67. pg. 225-237.
 - Hijnen, W. & van der Kooij, D. (1992). "The effect of low concentrations of assimilable organic carbon (AOC) in water on biological clogging of sand beds." Water Research, 26(7): 963-972.
 - Holzbecher, E. & Nützmann, G. (2003). "On Bank Filtration and Reactive Transport Modeling." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank



- Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). Sept. 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Horne, A.J. & Golman C.R. (1994). "*Limnology*." Second Editions MacGraw – Hill International Editions. 1994.
 - Hubbert, M.K. (1940). "*The theory of groundwater motion*." Journal of Geology, 48 (8): 725-944.
 - Hubbs, S., Hunt, H.C. & Schubert, J. (2003). "*The Costs and Benefits of Riverbank-Filtration Systems*." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. California.
 - Huisman, L., & Olsthoorn, T.N. (1983). "*Artificial Groundwater Recharge*." Pitman, London (United Kingdom). 320 pp.
 - Hunt, H. (2003). "*Construction and Maintenance of Wells for Riverbank Filtration*." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
 - IGME. (1972 y posteriores). "*Evolución piezométrica de los acuíferos de la cuenca del Duero*".
 - IGME. (1978-1982). "*Investigación hidrogeológica de la Cuenca del Duero. Sistemas 8 y 12*". (PIAS).
 - IGME. (1979). "*Investigación hidrogeológica de la Cuenca del Duero. Sistemas 8 y 12*". (continuación).
 - IGME. (1980). "*La explotación de los recursos hidráulicos en la zona comprendida entre los ríos Voltoya y Trabancos*".
 - IGME. (1981). "*Investigación hidrogeológica de la Cuenca del Duero. Sistema 11*". (PIAS)"
 - IGME. (1982a). "*Mapa hidrogeológico de España, hoja 37, Salamanca*". Escala 1:200.000,.
 - IGME. (1982b). "*Calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos terciarios detríticos de la Cuenca del Duero*". Primer Informe
 - IGME. (1982c). "*Investigación hidrogeológica de la Cuenca del Duero. La explotación de los recursos hidráulicos en la zona comprendida entre los ríos Voltoya y Trabancos*".
 - IGME. (1982d). "*Mapa Geológico de España*". Escala 1: 50.000. Hoja de Olmedo (428), Arévalo (455), Navas de Oro (429) y 456, Nava de la Asunción. 2ª Serie. CGS-IMINSA.
 - IGME. (1983). "*Evolución piezométrica de los acuíferos en la Cuenca del Duero. Análisis del periodo 1972-1981. Primer Informe*".
 - IGME. (2000d). "*Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*". MCT.
 - IGN. (1985). Mapa Topográfico Nacional de España de la zona de estudio a escala 1:25.000. Olmedo (428-II), Coca (428-IV) y Santiuste de San Juan Bautista (455-II). Escala 1:25.000. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
 - IRYDA. (1990). "*Proyecto de Asistencia Técnica para el Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia)*". Documento técnico no publicado. IRYDA-ITGE., 1990.
 - Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. (1989). "*An introduction to Applied Geostatistics*." Oxford University Press, New York.
 - ITGE. (1987). "*Criterios geoambientales para la restauración de canteras, graveras y explotaciones a cielo abierto en la comunidad de Madrid*". Serie: Ingeniería Geoambiental, 1987.
 - ITGE. (1989). "*Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*". Serie: Ingeniería Geoambiental, 1989.
 - ITGE. (1989a). "*Informe sobre la hidrogeología de la zona de Villagonzalo de Coca, Villeguillo, Ciruelos de Coca y Santiuste de San Juan Bautista*". No publicado.
 - ITGE. (1989b). "*Mapa hidrogeológico de España, hoja 29, Valladolid y hoja 37, Salamanca*". Escala 1:200.000. Autores no especificados en la carta.
 - ITGE (1990). "*Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del Norte de España*".
 - ITGE. (1991). "*Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos*". Serie: Lucha contra la contaminación.



- ITGE. (1993a). “Las aguas subterráneas en España”. ITGE.
- ITGE. (1993b). “Evolución piezométrica de los acuíferos de la cuenca del Duero. Período 1982-1991.” Segundo informe.
- ITGE. (1994). “Guía de restauración de graveras.” Serie: Ingeniería Geoambiental, 1994.
- ITGE. (1996). “Calidad química y contaminación de las aguas subterráneas en España, periodo 1982-1993.” Cuenca del Duero.
- ITGE. (1998). “Conceptos básicos de microbiología de las aguas subterráneas.” MIMAM.
- ITGE. (2000a). “Recarga artificial de acuíferos.” ITGE.-Exma.Dip. Provincial de Alicante.
- ITGE. (2000b). “Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias.” ITGE. Ministerio de Ciencia y Tecnología (e.a. M.C.T.).
- Icold, D. (1998). “World Register of Dam.” 1984 Full edition and 1988 up dating. International Commission on Large Dam. París.
- Iglesias, J.A., Sánchez, E., López Camacho, B., Muñoz, I., Cabrera, I y Pérez, J.M. (2001). “El uso conjunto en el abastecimiento de agua de Madrid: recarga artificial.” Revista Hidropres de tecnología y gestión del agua nº 31. Octubre de 2001.
- Ingebritsen, S. & Sanford, W. (1998). *Groundwater in Geologic Processes*. Cambridge University Press.
- I.N.M. (1954-2003). *Datos termométricos y pluviométricos*. Estaciones 2502i, Pedrajas De San Esteban; 2503e, Olmedo Azucarera; 2503, Olmedo; 2484, Coca Maestro Nacional; 2483, Navas De Oro; 2501, Nava De La Asunción; 2502, Santiuste De San Juan Bautista; 2460, San Cristobal De La Vega. Instituto Nacional de Meteorología. MIMAM.
- Jackson, T. (2002). “Remote sensing of soil moisture: implications for groundwater recharge.” *Hydrogeology Journal* Vol 10, nº 1. Feb 2002. Aih-Springer.
- Jiin-Shuh Jean. (1999). “Outbreak of enteroviruses and groundwater contamination in Taiwan: Concept of biomedical hydrogeology.” *Hydrogeology Journal* Vol 7 Nº 4 Ago 1999.
- Johnson, A.I. (1967). “Specific yield. Compilation of specific yields for various materials.” US Geol Surv Water-Supply Paper 1662-D, 74 pp.
- Jolly, I., Cristen, E., Gilfedder, M., Leaney, F., Trehwella, B. & Walker, G. (2000). “On-farm and community-scale salt disposal basins on the Riverine Plain. Guidelines for basic use.” CSIRO Land and Water . Murray and Darling Commission. Technical Report nº 12/00. December, 2000. 138 pp. Australia.
- Arthur, J., Dabous, A.A., & Cowart, J.B. (2002). “Mobilization of arsenic and other trace elements during aquifer storage and recovery, southwest Florida.” US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEON. (1985). “Informe final del Estudio sobre la situación de los recursos del acuífero superficial de la intercuenca: Eresma-Adaja (zona de Coca. Segovia).” Documento interno no publicado.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. (1986-1988). “Estudio Hidrogeológico de la Moraña.” Documento interno no publicado.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. (1997). “Douro/Duero.” Cd-Rom que contiene la cartografía (topográfica, usos del suelo, unidades morfoestructurales, unidades naturales y espacios naturales) y los datos elaborados con motivo del Proyecto Duero/Douro Región Fluvial (Programa Terra) Fondos cartográficos y fotogramétricos del centro de información territorial (CIT). Junta de Castilla y León - Consejería de Fomento - Dirección General de la Vivienda, Urbanismo y Ordenación del Territorio.
- Kelly, A. R. (2002). “Desinfección con cloro y riesgos de los productos derivados de la desinfección”. Agua Latinoamericana. Julio/Agosto:46-48.
- Kharaka, Y.K., & Mariner, R.H. (1989). “Chemical Geothermometers and their Application to formation waters from sedimentary basins.” N.D. Näser & T.H. McCulloh (Eds.), *Thermal History of Sedimentary Basins; Methods and Case Histories* (pp. 99-117). Springer Verlag.
- Keller, E.A. (1986). “Investigation of active tectonics: Use of surficial earth process.” En *active tectonics* (R.E. Wallace edits.). *Studies in geophysics*. Not. Acad. Press. Washington D.C., 136-147.



- Kershaw, K.A. (1973). "*Quantitative and Dynamic plant ecology*." Edward Arnold (Publishers) Limited. London.
- Knight, J.H. (1999). "*Root distribution and water uptake patterns in eucalypts and other species*." In Landsberg, J.J. (Ed.) 'The way trees use water'. Water and Salinity Issues in Agroforestry No. 5. RIRDC Publication No. 99/37. 92 pp.
- Kopchynski, T., Fox, P., alsmadi, B. & Berner, M. (1996). "*The effects of soil type and effluent pretreatment on soil aquifer treatment*." Water science technology, 34 (11): 235-242.
- Krul, WF, Liefvrick, FA (1946). "*Recent groundwater investigations in the Netherlands*." Monograph on the progress of research in Holland. Elsevier, New York, 78 pp.
- Kuenen J.G. & Jetten, M.S.M. (2001). "*Extraordinary anaerobic ammonium-oxidizing bacteria*." Am Soc Microb News 67(9):456-463.
- Laín, L. (1999). "*Los sistemas de información geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*." IGME.- MIMAM.
- Lamontagne, S, Dighton, J & Ullman, W. (2002). "*Estimation of groundwater velocity in riparian zones using point dilution tests*." CSIRO Land and Water Technical Report n° 14/02. May, 2002. 16 pp. Australia.
- Langelier, W.F & Piper, A.H. (1944). "*Discussion of a graphic procedure in the interpretation of water analyses*." American Geophysics Union Trans. vol. 25. 1944.
- Langmuir, D. (1997). "*Aqueous environmental geochemistry*." Prentice Hall, 1997.
- Larry, W. & Canter, M.C. (1998). "*Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impactos*." Mc Graw Hill, 1998.
- Laszlo, F. (2003). "*The Hungarian Experience with Riverbank Filtration*." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Leaney, F. & Christen, E.W. (2000). "*On-farm and community-scale salt disposal basins on the Riverine Plain. Guidelines summary*." CSIRO Land and Water . Murray and Darling Commission. Technical Report n° 12/00. December, 2000. 38 pp. Australia.
- Leenheer, J (2002). "*Processes Controlling Attenuation of dissolved Organic Matter in the Subsurface*." US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- Legg, C. & Sagstad, S. (2002). "*Optimization and use of various recharge techniques for reclaimed wastewater at a sensitive site in Glendale, Arizona*." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Lenntech Ed. (1998-2004). "*Glosario del agua*." Lenntech Agua residual & purificación del aire Holding B.V. Rotterdamseweg 402 M. 2629 HH Delft, The Netherlands. España-México-Estados Unidos-Chile-Argentina.
- Lerner, D.N. (1997). "*Groundwater recharge*." In: Saether OM, de Cariat P (editors). Geochemical Processes, weathering and groundwater recharge in catchments. AA Balkema, Rotterdam. Pp 109-150.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. & Simmers, I. (1990). "*Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural resource*." IAH Int contribution Hydrogeology, 8. Heinz Heise, Hannover, 345 pp.
- Levante de Castellón. (2001). "*La Universitat Jaume I apoya la recarga artificial de acuíferos y zonas húmedas*". Artículo de prensa. 23/03/2001.
- Llamas M.R. (1995). "*La explotación y gestión de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales españoles: una perspectiva ecológica*." Las aguas subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un decenio de Experiencia, Murcia pp. 329 – 343.
- Llamas, M.R., Villarroya, F.; Hernández García, M^a E. (1996). "*Causes and Effects of Water Restrictions in Madrid during the Drought of 1990/93*." Hydrology and Hydrogeology of Urban and Urbanizing Areas. 1996 AIH Annual Meeting. American Institute of Hydrology. Boston, Massachusetts, April, 21-26, WQD10-19.



- Martínez Cortina, L; Hernández-Mora, N. y Llamas, M.R. (2000). “*El uso sostenible de las aguas subterráneas en España.*” Fundación Marcelino Botín, Proyecto Aguas Subterráneas. Serie A, nº 1. Fundación Marcelino Botín, Madrid, 54 pp.
- Llamas, M.R. (2001). “*Aguas subterráneas: retos y oportunidades.*” Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-prensa.
- Lloyd, J.W., & Heathcote, J.A. (1985). “*Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An Introduction.*” Oxford: Clarendon Press, 1985.
- Lluria, M.R., T. L. Gorey, & R. B. Mack. (1991). “*Hydrochemistry and chemical compositional changes of ground water from a deep well recharge operation using river water subjected to limited on-site treatment.*” *Proc. of 5th Bieennial Symp. on Artificial Recharge of Groundwater*, Tucson, Arizona (USA): 155-168.
- López Cadenas de Llano, F., Mintegui, J.A. (1986). “*Hidrología de superficie.*” Tomo I.” Fundación Conde del Valle de Salazar. ETSI. de Montes. Madrid.
- López, E. (2002). “*El modelo cualitativo de investigación educativa (I). Cuestiones generales.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 573 (7).
- López, E. (2002). “*El paradigma positivista de investigación (I): la investigación experimental.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 549 (3).
- López, E. (2002). “*El paradigma positivista de investigación (II): El problema de la validez en la investigación educativa.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 553 (5) y 564 (6).
- López, E. (2002). “*La investigación-acción.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 617 (8).
- López, E. (2002). “*Los modelos de innovación educativa.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 627 (9).
- MAPA. (1985/89). “*Mapa de cultivos y aprovechamientos (M.C.A.).*” Escala 1:50.000. Hojas nº 428 y 455. Hoja 428, trabajos de campo finalizados en 1983 y editada en 1989. Hoja 455, trabajos de campo finalizados en 1984 y editada en 1985.
- MAPA. (1990). “*Proyecto de Asistencia Técnica para el Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste –Segovia–.*” Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (e.a. IRYDA).
- MAPA. (1996). “*Nota Informativa del Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia) para la Recarga del Acuífero*”.1996. Informe interno de D. Manuel Álvarez Chain, por entonces geólogo de la Secretaría General de Desarrollo Rural (MAPA.). No publicado.
- MAPA. (1999a). “*Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Segovia).*” Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MAPA. (1999b). “*Anteproyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia).*” IRYDA.
- MAPA. (1999c). “*Proyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia).*” Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec.
- MAPA. (2000). “*Proyecto de A.T. Gestión de los Recursos Hídricos del Acuífero de Los Arenales, Carracillo (Segovia).*” Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- MAPA. (2001). “*Proyecto de Investigación Hidrogeológica y Obras de Apoyo para la definición del acuífero de Los Arenales en la comarca del “El Carracillo (Segovia).*” Dirección General de Desarrollo Rural-Tragsatec (no publicado).
- Martín-Alonso, J. (2003). “*Combined Use of Surface Water and Groundwater for Drinking Water Production in the Barcelona Metropolitan Area.*” Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Martínez, A. (2002). “*Notas sobre el cálculo del consumo de agua por los cultivos , para el modelo matemático del control hidrogeológico de la zona regable del río Adaja (Ávila).*” Junta de Castilla y León. Documento interno no publicado. Septiembre de 2002.



- Massmann, G., Pekdeger, A. & Merz, C. (2002). "Geochemical processes during riverbank filtration in a polder region bordering the river Oder, Germany." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Maucha, R. (1949). "The graphic symbolization of the chemical analyses of natural waters." Hidrol. Kozlony. vol. 29, 1949.
- Mills, W. (2002). "The quest for water through artificial recharge and wastewater recycling." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- MIMAM. (1996). "Indicadores ambientales. Una propuesta para España". Secretaría General de Medio Ambiente, 1996.
- MIMAM. (1997). "Educación ambiental para el desarrollo sostenible." Serie monografías Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.
- MIMAM. (1998a). "Programas de redes básicas de control de las aguas subterráneas. Cuencas intercomunitarias y Baleares." Serie monografías. MIMAM. Centro de publicaciones, 60 pgs.
- MIMAM. (1999a). "Estrategia española para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica." Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- MIMAM. (1999b). "Libro Blanco de la Educación Ambiental en España." Comisión Temática de Educación ambiental. Secretaría General de Medio Ambiente.
- MIMAM. (2000). "Guía Para La Elaboración de Estudios del Medio Físico. Contenido y Metodología." 4ª Ed. Madrid.
- MIMAM. (2000a). "Plan estratégico español para la conservación de los humedales, en el marco de los ecosistemas acuáticos de que dependen." OOAA Parques Nacionales, Madrid.
- MIMAM. (2000b). "Libro Blanco del Agua en España 2000 (LBAE)." MIMAM. Madrid. 637 p.
- MIMAM (2000c). "Indicadores Ambientales. Una propuesta para España." Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. 2000.
- MIMAM. (2001). "Caracterización de las fuentes agrarias de contaminación de las aguas por nitratos." Dirección General de obras hidráulicas y calidad de las aguas. Subdirección general de tratamiento y control de calidad de las aguas.
- MIMAM. (2002). "Estudio del sistema de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas del Cega-Pirón y del Adaja-Eresma." MIMAM-PROINTEC.
- MIMAM.-ITGE. (1999). "PAIH. Programa de actualización del inventario hidrogeológico." Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Análisis de la situación actual del conocimiento de los acuíferos por cuencas.
- Mingarro, F. y Ordóñez, S. (1982). "Petrología exógena I." Ed. Rueda. Madrid.
- MOPTMA. (1990). "Estudio de las zonas húmedas de la España peninsular. Inventario y tipificación." Dirección General de Obras Hidráulicas.
- MOPTMA. (1993).- "Estudio de caracterización de la unidad hidrogeológica "Región de Los Arenales" (02.17)." Dirección General de Obras Hidráulicas.
- MOPTMA. (1994). "Informe sobre la posibilidad de recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Segovia)." Informe técnico no publicado. Servicio Geológico de Obras Públicas, SGOP.
- MOPTMA. (1995). "Actualización del Inventario de Zonas Húmedas." Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid. Informe interno no publicado.
- MOPTMA. (1999). "Informe sobre la situación piezométrica actual de la unidad hidrogeológica Región de Los Arenales (02.17)." Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- MOPTMA.-MINER (1994). "Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (LBAS)." Serie Monografías. Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Maddock I.P., Petts G.E., Evans E.C., Greenwood M.T. (1995). "Assessing river-aquifer interactions within the hyporheic zone." In: Brown AG (ed) Groundwater and geomorphology. Wiley, Chichester, pp 53-74.



- Madsen, B., Henriksen, H.J. & Knudby, C. (1998). "The national water resource model developed for the assessment of the distribution and protection of the Danish groundwater resources." En Brahma *et al.* IAH/AIH joint conference Gambling with groundwater – physical, chemical and biological aspects of aquifer stream relations, p 219 – 226.
- Magister, M. (1982). "Erosión y conservación de suelo." ETS. Ingenieros Agrónomos. UPM. Madrid.
- Manzano, M (2003). "El papel del agua subterránea en la génesis y el mantenimiento del medio natural." Revista Hidropres de tecnología y gestión del agua nº 39. Agosto-Octubre 2003.
- Margalef, R. (1983). "Limnología." Ediciones omega, S.A., Barcelona, 1010 pp.
- Margalef, R. (1987). "Teoría y modelado de los sistemas fluctuantes." Bases científicas para la protección de los Humedales en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, pp. 31-42.
- Margalef, R. (1992). "Ecología." Editorial Planeta. Marzo 1992.
- Martí, R (2001). "Importancia ornitológica de los humedales españoles." Sociedad española de ornitología. Curso humedales cuenca del Duero***.
- Martin, R. & Dillon, P.J. (2002). "Aquifer Storage and Recovery. Future directions for South Australia." Department of water, Land and Biodiversity conservation. CSIRO Land and Water. Report 2002/04. August 2002. Australia.
- Martínez de Pisón, E. (1977). "Los paisajes naturales de Segovia, Ávila, Toledo y Cáceres." Estudio Geográfico. Instituto de Estudios de Administración Local.
- Martino, P. (1988). "Limnología de las aguas salinas españolas." Tesis doctoral Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- Mateos, R. y López, J.M. (2002). "Impacto de la explotación de los acuíferos sobre la calidad del agua." Instituto Geológico y Minero de España. Palma de Mallorca.
- Matter, W.J. & Mannan, R.W. (1988). "Sand and gravel pits as fish and wildlife habitat in the Southwest." US. Fish Wildl. Serv. Resour. Publ. 171. 11 pp. <http://www.fws.gov/>
- Maxey, G.B. & Eakin, T.E. (1950). "Ground water in White River Valley, White Pine, Nye, and Lincoln Counties, Nevada." NV State Eng Water Resour Bull 8, 59 pp.
- McWhorter, D.B. (1971). "Infiltration affected by flow of air." Hydrology Paper 49. Colorado State Univ, Fort Collins, CO, 43 pp.
- MEDWET & RAMSAR (1998). "A Strategy for Mediterranean Wetlands." Med-Wet Secretariat Unit (EKBY) & Ramsar Bureau. Thessaloniki, Greece.
- Menció, A., Mas-Pla, J. y Vilanova, E. (2003). "Análisis de las posibilidades de la recarga artificial de aguas residuales en el contexto hidrológico de la cuenca del río Onyar (Cuencas internas de Cataluña)." Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco del agua. Medidas de corrección. Zaragoza, 20-22 de noviembre de 2002. IGME.
- Meyboom, P. (1966). "Unsteady groundwater flow near a willow ring in a hummocky moraine." J Hydrol 4:38–62.
- Meyboom, P. (1967). "Mass transfer studies to determine the groundwater regime of permanent lakes in hummocky moraine of western Canada." J Hydrol 5(2):117–142.
- Meyer, W.R. (1962). "Use of a neutron moisture probe to determine the storage coefficient of an unconfined aquifer." USGS prof. Paper 450-E:174–176.
- Miettinen, I., Lehtola, M., Vartiainen, T. & Martikainen, P. (2003). "Microbial Regrowth in Artificially Recharged Groundwater: Experiences from a 4-Year Project." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Mintz, D.M. (1964). "Theoretical principles of water purification." Building and Construction Publ., Moscow (in Russian).
- Mitchell, B.A. and Correll, R.L. (1987). "The soil water regime in a young radiata pine plantation in southeastern Australia." New Forests 4:273-289.
- Mitsch, W.J. & Gosselink, J.G. (1993). "Wetlands." Van Nostrand Reinhold. New York.
- Moench, A.F. (1994). "Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data." Groundwater 32:949–957.



- Montes, C. & Martino, P. (1986). “*Las lagunas salinas españolas*”. En: “Seminario sobre Bases Científicas para la Gestión de los Humedales Españoles”: 95-145. Real Academia de Ciencias Exactas. Madrid.
- Montes, C. (1995a). “*La gestión de los humedales españoles protegidos. Conservación vs confusión*.” El Campo, 132. Estudios de las zonas húmedas continentales de España. Inventario, Tipificación, relación con el régimen hídrico general y medidas de protección. INITEC. DG Recursos Hidráulicos. MOPU. Madrid.
- Montes, C. (1995b). *La gestión de los humedales españoles protegidos: Conservación vs. Confusión*. Monográfico sobre el Agua. El Campo-B.B.V.
- Montes, C. (coord), (1991). “*Estudios de las zonas húmedas continentales de España. Inventario, Tipificación, relación con el régimen hídrico general y medidas de protección*.” INITEC. DG Recursos Hidráulicos. MOPU. Madrid.
- Montes, C., Oliver, J., Medina, F. y Cobos, J. (1995). “*Bases ecológicas para la restauración de los humedales en la cuenca mediterránea*.” Agencia del Medio Ambiente. Sevilla: 1-348.
- Montgomery, H. (1987). “*U.K. Experience in the ground water recharge of threatened sewage: Potential for irrigation purposes*.” Irrig. & Drainage Eng.
- Moore, I.D., Lewis, A. & Gallant, J.C. (1993). “*Terrain Attributes: Estimation Methods and Scale Effects, Modeling Change in Environmental Systems*.” A.J. Jakeman et al. editors, John Wiley and Sons, New York.
- Moorman, J.H.N., Colin, M.G. & Stuyfzand, P.J. (2002). “*Iron precipitation clogging of a recovery well following nearby deep well injection*.” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Morales, J. (1998). “*Guía práctica para la interpretación del patrimonio. El arte de acercar el legado natural al público visitante*”. TRAGSA, Junta de Andalucía. Colección Difusión, 1998.
- Moran, C.J., Dovers, S., Marcar, N., Doherty, M., Shaw, R., Bartley, G., Burtle, J., Creighton, G., Dyson, P., Evans, R., Jolly, I., Milligan, A., Veitch, S. & Young, W. (2001). “*Development of interim national standards for surface water and salinity: Expert supports and technical advice to Working Group on Natural Resources Managements Standards*.” CSIRO Land and Water Canberra. Technical Report 42/01, September 2001. 68 pp. Australia.
- Moreno, L., Martínez, C., López Geta, J.A. y Navarrete, P. (1991). “*Guía Metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*.” ITGE. Madrid. 289 p. ISBN: 84-7840-091-5.
- Mujeriego, R. y Sala, L. (1991). “*Golf course irrigation with reclaimed wastewater. Wastewater reclamation and reuse*.” Water Science and Technology, vol. 24, nº. 9. International Association on Water Pollution Research and Control. Pergamon Press.
- Murillo, J.M. (2000). “*Recarga artificial de acuíferos o como introducir y almacenar agua en los acuíferos*.” Terralia. La revista independiente del medio rural. Año 4. nº 15. Junio de 2000.
- Murillo, J.M., de la Orden, J.A. y Rodríguez, L. (2001). “*La recarga artificial como técnica de recuperación de acuíferos contaminados. Aplicación a la Plana de Vergel (Alicante)*.” IGME., 2001.
- Murillo, J.M., Durán, J.J., Orden, J.A. de la, López Geta, J.A. (2002). “*Experiencia piloto de recarga artificial en el acuífero de Mitidja (Argelia)*.” Curso de recarga artificial de acuíferos.” IGME.- Agencia Española de Cooperación Internacional. Técnicas Hidrogeológicas y de Servicio.
- Nagra R.M. & Spycher N. (1984). “*Calculations of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermy and studies of boiling and dilution*.” Geochimica and Cosmochimica Acta, 48, pp. 1479-1492.
- Neuman, S.P. (1972). “*Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table*.” Water Resour Res 8:1031-1045.
- Nordstrom, D.K. & Ball, J.W. (1989). “*Mineral saturation states in natural waters and their sensitivity to thermodynamic and analitic errors*.” Sci. Geol. Bull., 42: 269-280.
- Nordstrom, D.K., Plummer, L.N., Langmuir, D., Busenberg, E., Man, H.M., Jones, B. F., & Parkhurst, D.L. (1990). “*Revised Chemical Equilibrium Data for Major Water-Mineral Reactions*



- and their Limitations.*” Chemical Modelling of Aqueous Systems Systems II (Melchior y Basset, eds.). Washington. American Chemical Society. D.C. Melchior & R.L. Bassett (Eds.). 416: 398-413.
- Nwankwor GI, Cherry JA, Gillham RW (1984). “*A comparative study of specific yield determinations for a shallow sand aquifer.*” Groundwater 22:764–772.
 - OMS. (1989). “*Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en Agricultura y Acuicultura.*” Informe de un Grupo Científico de la Organización Mundial de la Salud (e.a. OMS.). Ginebra 1989. Serie de Informes Técnicos 778. [en <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/dis/dis.html>].
 - Olsthoorn, T.N. (1982). “*The clogging of recharge wells, main subjects.*” *KIWA-communications* 72, Working group on recharge wells (Rijswijk, The Netherlands), 136 pp.
 - Olsthoorn, T.N. & Mosch, M.J. (2002). “*Fifty years artificial recharge in the Amsterdam dune area.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
 - ONU. (1972). “*Declaración de Estocolmo sobre el Medio Humano 1972.*” Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, reunida en Estocolmo del 5 al 16 de junio de 1972.
 - Orr, C. (1977). “*Filtration principles and practices. Part I.*” Edited by C. Orr. *Marcel Dekker Inc., New York, USA.* Chapter 2 (Akers & Ward) and Chapter 3 (Rushton & Griffiths): 169-308.
 - Parkhurst D.L., Thorenston D.C. & Plummer N.L. (1980). “*PHREEQE. A computer program for geochemical calculations.*” US. Geological Survey Water Resource Investigations 80-96 210 pp. <http://gwrp.cciw.ca/gwrp/software/software.html>.
 - Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C. & Plumer, L.N. (1990). “*PHREEQE, a computer program for geochemical calculations.*” Revised by J.V. Tisarani y P.D. Glynn. US. Geol. Surv. Waters Res. Inv., 80-96: 193 pp.
 - Parkhurst, D.L. & Matthew D. (2002). “*Geochemical Modeling of an Aquifer Storage Recovery Experiment, Charleston, South Carolina.*” Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002. pp. 38-41.
 - Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K., Herczeg, A., Rattray, K., Hekmeijer, P & Gerges, N. (1998). “*Well clogging effects determined from mass balances and hydraulic response at a stormwater ASR site.*” Third Int. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR). 21-25 September 1998. In: J.H. Peters et al., Balkema, Amsterdam, the Netherlands. pp. 61-66.
 - Pavelic. P., & P. Dillon. (1996). “*The impact of two seasons of stormwater injection on groundwater quality in South Australia.*” Proc. of the Internat. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (Helsinki, Finland): 105-110. Edited by A-L. Kivimaki and T. Suokko.
 - Pavelic, P., Dillon, P.J., Toze, S., Barber, C., Yin Foo, D.A., Knapton, A. & Jolly, P.B. (2002). “*Water banking in the Australian tropics: results from a trial on South Goulburn Island, Northern Territory.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
 - Pérez-González, A. (1979). “*El Cuaternario de la región central de la Cuenca del Duero y sus principales rasgos geomorfológicos.*” 1ª Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero. Parte II. IGME.
 - Pérez-Paricio, A. & Carrera, J. (1998a). “*A conceptual and numerical model to characterize clogging.*” Artificial recharge of groundwater, Peters,J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
 - Pérez-Paricio, A. & Carrera, J. (1998b). “*Operational guidelines regarding clogging.*” Artificial recharge of groundwater, Peters,J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
 - Pérez-Paricio, A. y Carrera, J. (1999a). “*Clogging Handbook*” (Manual de Colmatación). Proyecto Europeo de Recarga Artificial de Acuíferos. Universidad Politécnica Cataluña, Barcelona. 117 pg.



- Pérez-Paricio, A. (1999b). "*Site description Cornellà, Spain.*" Proyecto Europeo de Recarga Artificial de Acuíferos. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona.
- Pérez-Paricio, A. (2000a). "*Integrated modelling of clogging of artificial recharge systems.*" Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pérez-Paricio, A., Benet, I., Ayora, C., Saaltink, M. y Carrera, J. (2000b). "*CLOG: A code to address the clogging of Artificial Recharge systems.*" Simposio international: Computer Methods for Engineering in Porous Media, Flow and Transport, 28/9 al 1/10 de 1998. Giens (Francia). Ed.: J.M. Crolet.
- Persim, F. (2002). "*Arsenic et fluor: des traitements peu couteux.*" Hidroplus, nº 120. Février 2002.
- Peters, D.G. (1966). "*Standard Methods of Chemical Analysis.*" F. J. Welcher, ed., Van Nostrand, Princeton, New Jersey, sixth edition, Volume III, Part A, pp. 404-427.
- Peters, J.H., et al. (1998). "*Artificial Recharge of Groundwater.*" Editor of the Proc. of the Third Int. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR). 21-25 September 1998, Amsterdam. Publ. by A.A. Balkema (Rotterdam, the Netherlands).
- Petheran, C, Zhang, L, Walker, G & Grayson, R. (2000). "*Towards a Framework for predicting impacts of land-use on recharge. A review of recharge studies in Australia.*" CSIRO Land and Water. Technical Report nº 28/00. September, 2000. 35 pp. Australia.
- Peyton, D. (2001). "*Fines control system - modified recharge basin floors maximize infiltration efficiency.*" Proceedings of Tucson, Arizona (USA). Recharge Symposium 2001. USA. <http://groups.msn.com/RechargeRidges/homepage>.
- Peyton, D. (2002). "*Modified recharge basin floors to control sediment and maximize infiltration efficiency.*" Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Picó, J.M. (2001). "*La universitat Jaume I apoya la recarga artificial de acuíferos y zonas húmedas.*" Levante de Castellón. 23-03-2001. Valencia.
- Pino, M.E. (2001). "*Análisis de indicadores de sostenibilidad medioambiental y urbana en las Agendas 21 local y ecoauditorías municipales. El caso de las regiones urbanas europeas.*" Departamento de construcciones arquitectónicas. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2001.
- Piper, A.M. (1944). "*A graphic procedure in the geochemical interpretation.*" American. Geophysics Union Trans, Vol. 25. 1944.
- PIRSA- CSIRO (2000). "*Surface soil texture data base.*" CSIRO Land and Water, Report 24/01. Canberra. July 2001.
- Ponce, V.M. (1989). "*Engineering Hidrology. Principles and Practices.*" Prentice Hall. New Jersey.
- Plummer, L.N. (1984). "*Geochemical modelling: a comparison of forward and inverse methods.*" En: Hitchon, B. & Walick, E.I. (eds.). Practical Applications of Ground Water Geochemistry. Proceedings of the First Canadian/American Conference of Hydrogeology. Banf, Alberta, Canada. High pressures and temperatures. J. Chem. Soc. Faraday. Trans., 88(6): 803-826.
- Plummer, L.N.; Prestemon, E.C. & Parkhurst, D.L. (1991). "*An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path.*" US. Geological Survey Investigations Report 91-4078. Reston, Virginia.
- Portero, J.M., Olmo, P. y Ramírez del Pozo, J. (1979). "*Síntesis del Terciario Continental de la Cuenca del Duero.*" 1ª Reunión Regional sobre Geología de la Cuenca del Duero. Salamanca (1979).
- Portero, J.M.; Del Olmo, P. y Olive, A. (1983). "*El Neógeno de la transversal Norte-Sur de la Cuenca del Duero.*" En: Libro Jubilar J.M. Ríos, Geología de España. Tomo II, 494-502. ITGE.
- Prickett, T.A. (1965). "*Type-curve solution to aquifer tests under water-table conditions.*" Groundwater 3:5-14.
- Queralt, R. (2000). "*Hidrograma para la representación de la calidad y contaminación de las aguas subterráneas. Su aplicación práctica en Catalunya.*" Rev. Tecnología del Agua nº 197. Febrero de 2000.
- Querner, E.P. (2000). "*The effects of human intervention in the water regime.*" Ground Water 38:167-171.



- Rey Benayas, J. M. (1990). “*Ecosistemas de descarga de acuíferos en la Cuenca del Duero.*” Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- Rey Benayas, J. M. (1991). “*Aguas Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de Acuíferos en Los Arenales.*” ICONA.-CSIC. Colección Técnica ICONA.- MAPA.
- Rey Benayas, J.M. (1992a). “*Tipología y génesis de los ecosistemas de descarga de acuíferos en Los Arenales.*” Curso de humedales de la cuenca del Duero. Hábitats de descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Los Arenales. Actuaciones para su protección. Biblioteca de Educación Ambiental. Sección C: documentación técnica de medio-ambiente. Junta de Castilla y León.
- Rey Benayas, J.M. (1992b). “*Diversidad de las comunidades vegetales en los humedales de los arenales y espacios protegidos.*” Curso de humedales de la cuenca del Duero. Hábitats de descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Los Arenales. Actuaciones para su protección. Biblioteca de Educación Ambiental. Sección C: documentación técnica de medio-ambiente. Junta de Castilla y León.
- Rey Benayas, J.M., Herrera, P. (1988). “*Acuíferos esquilados.*” Revista Quercus, nº 34. Diciembre 1988.
- Rey Benayas, J.M.; García S.-Colomer, M., & Levassor, C. (1999). “*Effects of area, environmental status and environmental variation on species richness per unit area in Mediterranean wetlands.*” Journal of Vegetation Science 10: 275-280.
- Rey Benayas, J.M.; Espigares, T y Nicolau, L.M. (editores) (2003). “*Restauración de ecosistemas mediterráneos.*” Colección Aula Abierta. Universidad de Alcalá.
- Rinck-Pfeiffer, S., S. Ragusa, Sztajn bok, P. & Vandevelde, T. (2000). “*Interrelationships between biological, chemical and physical processes at an analog in aquifer storage and recovery (ASR) wells.*” Water Research, :38(7): 2110-2118.
- Rinck-Pfeiffer, S., Dillon, P.J., Ragusa, S & Hutson, J. (2002). “*Injection well clogging processes during aquifer storage and recovery (ASR) with reclaimed water.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Rivas, S. (1986). “*Vegetación de las zonas encharcables españolas.*” En: “Seminario sobre Bases Científicas para la Gestión de los Humedales Españoles”: 185-190. Real Academia de Ciencias Exactas. Madrid.
- Roberts, J. & Marston, F. (2000). “*Water regime of wetland & floodplain plants in the Murray-Darling Basin. A source book of ecological knowledge.*” CSIRO Land and Water Canberra. Technical Report 30/00, October 2000. 58 pg. Australia.
- Ronald, O. (2002). “*Microbial Redox Cycling of Arsenic Oxyanions in Anoxic Environments.*” US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- Rostad, C. (2002). “*Fate of Disinfection By-products in the Subsurface.*” US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- Roy., E, Berroya, J., Sancho, J. y Carbajo, R. (2001). “*Restauracion del Hábitat Fluvial en Castilla y León: Experiencias y Perspectivas.*” Congreso de restauración de ríos y humedales mediterráneos. CEDEX. Madrid, Octubre de 2001.
- Rüetschi, D., Geissbühler, U. & Wüthrich, Ch. (1998). “*Biological purification of recharge water by forested soils.*” Artificial recharge of groundwater, Peters,J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- Rushton, K.R. (1988). “*Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semiarid zonas.*” In: Simmers I (Ed.) Estimation of natural groundwater recharge. NATO ASI, series C 222. Reidel, Dordrecht. Pp 213-238.
- Ryan, J.N., & M. Elimelech. 1996. “*Colloid mobilization and transport in groundwater*”. Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects, 107: 1-56.



- Samper, J. (2002). “*Caracterización de las aguas subterráneas en la directiva Marco del Agua: visión desde la investigación.*” Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco del agua. Medidas de corrección. Zaragoza, 20-22 de noviembre de 2002. IGME.
- Sánchez Palomares, O. y Blanco, A. (1985). “*Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos.*” Rev. Montes 4, 26-30.
- Sandlund, O.T., & Viken, Å. (Eds.) (1997). “*Report from Workshop on Freshwater Biodiversity.*” Selbu, Norway, 5.-7. June 1997. The Trondheim Conferences on Biodiversity.
- Schoeller, H. (1962). “*Geochimie des eaux souterraines.*” Paris, 1962.
- SGOP. (1993). “*Estudio de caracterización Hidrogeológica de la Unidad Región de los Arenales.*” Informe técnico no publicado.
- SGOP. (1994). “*Informe sobre la posibilidad de recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Segovia).*” Informe técnico no publicado.
- Salama, R.B., Bartle, G.A., Ye, L., Williamson, D.R., Watson, G.D. & Knampton, A. (1997). “*Hydrogeomorphology and Hydrogeology of the upper Kent river catchment and its control on salt distribution and patterns of groundwater discharge.*” Technical report nº 2797. CSIRO, November 1997. Australia.
- Salameh, E, Alawi, M, Batarseh, M, Jiries, A. (2002). “*Determination of trihalomethanes and the ionic composition of groundwater at Amman City, Jordan.*” Hydrogeology Journal, volume 10, nº 1, April 2002.
- Salazar, J. (2002). “*Los retos de la escuela ante la diversidad.*” Programación y evaluación curricular. Instituto de Ciencias de la Educación. pg. 298.
- Sánchez, I. (2002). “*Las fuentes documentales en investigación educativa.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. pg. 640 (10a y b).
- Sandlun & Viken (1997). “*Workshop on freshwater biodiversity.*” The Throndein Conferences on Biodiversity. Selbu, Norway. June 1997, pages 9).
- Sanford, W. (2002). “*Recharge and groundwater models: an overview.*” Hydrogeology Journal, volume 10, nº 2, april 2002.
- Santiuste Bermejo, Víctor. (2002). “*Historia y formación de la psicología del aprendizaje.*” Formación de profesores de educación secundaria. Instituto de Ciencias de la Educación, 2002. Pg 198 (2).
- Sayed, F. & Vafa, R. (1999). “*Tratamientos de escarificación para la restauración de la capacidad de infiltración inicial en drenes superficiales de recarga artificial de acuíferos.*” Hydrogeology Journal nº 7. AIH-SPRINGER.
- Scanlon, B.R, Healy, R & Cook, P. (2002). “*Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.*” Hydrogeology Journal, volume 10, nº 2, april 2002.
- Schicht, R.J. & Walton W.C. (1961). “*Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois.*” Illinois State Water Surv Rep Invest 40, 40 p.
- Schippers, J.C., J. Verdouw, & G.J. Zweere. (1995). “*Predicting the clogging rate of artificial recharge wells.*” Journal of Water Supply Research and Technology -Aqua (Oxford), 44(1): 18-28.
- Schnoebelen, D., Turco, M.J. & North, J.D. (2003). “*Groundwater Flow and Water Quality - A Flow Path Study in the Seminole Well Field, Cedar Rapids, Iowa.*” Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Schulz, H.D. & Zabel, M. (2000). “*Marine geochemistry.*” Springer, Berlin, Heidelberg.
- Secretaría del Convenio de Ramsar (1996). “*Plan Estratégico Ramsar 1997-2002.*” Actas de la 6ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes, Vol.5/12 Brisbane, Australia, 19-27 de marzo de 1996. Gland, Suiza.
- Secretaría del Convenio de Ramsar (1999). “*Actas de la 7ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes.*” San José de Costa Rica, 10-18 de mayo de 1999. Gland, Suiza.



- Silgado, A., Román, J., Martín, M. y Mantecón, R. (2002). “*Uso eficiente del agua en cuencas optimización de la gestión de los recursos hidráulicos mediante la recarga artificial. Experiencias en la cuenca del Guadalquivir.*” Internet: <http://www.unesco.org>.
- Simmons, C.T., Narayan, K.A., Woods, J.A., Herczeg, A.L. (2002). “*Groundwater flow and solute transport at the Mourquong saline-water disposal basin, southeaster Australia.*” *Hidrogeology Journal*, volume 10, nº 2, April 2002.
- Skinne, J. & Zalewski, S. (1995). “*Functions and Values of Mediterranean Wetlands. An overview on natural functions, resources and economic values of mediterranean wetlands.*” Medwet Publication - Tour du Valat: Conservation of mediterranean Wetlands. Nº2 (1995). Tour du Valat, Le Sambuc, 13.200-Arles, France.
- Sophocleous, M. (2002). “*Interactions between groundwater and surface water: the state of the science.*” *Hydrogeology Journal* Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Sophocleous, M. (1991). “*Combining the soil water balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects.*” *J Hydrol* 124:229–241 (STATSGO) data base, data use information. Misc Publ 1492, NRCS, Fort Worth, Texas.
- Spouncer, L., Davies, P., Guobin, L. & Chunseng, H. (2001). “*Ground truthing a GIS of the best estimate of profile pH, Mt Torrens, South Australia.*” CSIRO Land and Water. Technical Report 48/99, November 1999. 13 pp. Australia.
- Stabler, G. (1911). “*Some stream waters of the Western United States, with chapters on sediment carried by the Rio Grande and the industrial application of water analyses.*” *Water Resources Of Wyoming*. USGS. 188 p.
- Stephens D.B. (1996). “*Vadose zone hydrology.*” CRC Press–Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA.
- Steven, P. (2002). “*The Role of Saturated Flow in Artificial Recharge Projects.*” US. Geological Survey Artificial Recharge Workshop Proceedings, April 2-4, 2002, Sacramento, California. US. Geological Survey Open-File Report 02-89. April 2002.
- Stiff, H.A. (1951). “*The interpretation of a chemical water analyses by means of patterns.*” *Journal of Petrological Technology*. Nº 15. Oct. 1951.
- Stuyfzand, P.J. (1993). “*Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands.*” Ph.D. Thesis, edited by Kiwa. ISBN 90-74741-01-0, 366 pp.
- Stuyfzand, P.J. (1998). “*Quality changes upon injection into anoxic aquifers in the Netherlands: Evaluation of 11 experiments.*” *Artificial recharge of groundwater*, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- Stuyfzand, P.J. (2002a). “*Quantifying the hydrogeochemical impact and sustainability of artificial recharge systems.*” *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Stuyfzand, P.J. (2002b). “*Modelling the accumulation rate and chemical composition of clogging sludge layers in recharge basins with Easy-Leacher ® 4.6.*” *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Stuyfzand, P.J., Mosch, M. (2002). “*Formation and composition of sludges in recharge basins, recovery canals and natural lakes in Amsterdam’s dune catchment area.*” *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Stuyfzand, P.J., Vogelaar, A.J. & Wakker, J. (2002a). “*Hydrogeochemistry of prolonged deep well injection and subsequent aquifer storage in pyritiferous sands: DIZON pilot, Netherlands.*” *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.



- Sumner, M.E. & Stewart, B.A. (Eds), (1992). "Soil crusting: chemical and physical processes." Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. 372 pp.
- Temiño, J. (1995). "Análisis del origen y la dinámica de las lagunas de Cantalejo (Segovia) y caracterización de los riesgos ambientales derivados de su relación con las aguas subterráneas." VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla, 1995. Asociación española de hidrología subterránea.
- Theiss, T.L. & Singer, P.C. (1974). "Complexation of iron (II) by organic matter and its effect on iron(II) oxygenation." Environm. Sci. and Technol, 8(6): 569-573.
- Theiveyanathan, T., Benyon, R., Polglase, P., Myers, B. and El-Gendy, R. (2000). "Irrigation management for tree plantations in the southern Murray-Darling Basin." Connellan, G.J. (Ed.), 2000. Proceedings of the Irrigation Association of Australia 2000 National Conference on water essential for life, Melbourne 23-25 May, 2000, pp. 52-61.
- Todd, D.K. (1980). "Groundwater hydrology", 2nd edition. 535 pp. John Wiley and Sons, Inc. (trad. Ed. Paraninfo).
- Toran, L.E. & Saunders, J.A. (1999). "Modeling alternative paths of chemical evolution of Na-HCO₃-type groundwater near Oak Ridge, Tennessee, USA." Hydrogeology Journal, Vol 7, N° 4, Ago 1999-09-02. Springer Verlag.
- Tóth, J (1963). "A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basin." Journal of geophysical research. 68: 4785-4812.
- Tóth, J (1970). "A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment." Journal of Hydrology 10:164-176.
- Tóth, J. (1971). "Groundwater discharge: a common generator of diverse geologic and morphologic phenomena." Bull. Intern. Assoc. Scientific Hydrology, XVI (1-31): 7-24.
- Tóth, J. (1972). "Properties and manifestations of regional ground-water movement." Proc. 24th Geological Congress. Montreal, Sect. 11: 153-163.
- Tóth, J. (1995). "Hydraulic Continuity In Large Sedimentary Basins." Hydrogeology Journal, Volume 3, Issue 4 (1995), pp 4-16.
- Tóth, J (1999). "Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations." Hydrogeology Journal. Volume 7, Issue 1, pp 1-14.
- TRAGSA-TRAGSATEC. (1998). "Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de La Erosión." 2ª Edición Revisada y Ampliada. Mundi-Prensa Libros. Madrid.
- Tredoux, G. & Cavé, L.C. (2002). "Long term stormwater and wastewater infiltration into a sandy aquifer, South Africa." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Tsuchihashi, R., Asano, T., Sakaji, R.H. (2002). "Health aspects of groundwater recharge with reclaimed water." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Turner, D.R.; Whitfield, M. & Dickson, A.G, (1981). "The equilibrium speciation of dissolved components in freshwater and seawater at 25 °C and 1 atm. Pressure." Geochim. Cosmochim. Acta, 45: 855-881.
- Turner, J. (1998). "Surface water-groundwater interaction." Centre for groundwater studies. CSIRO Land and Water Bulletin, 1998. Australia.
- Tuinhof, A & Heederik, J.P. eds. (2002). "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. Making Better Use of Our Largest Reservoir." Papers of Seminar Wageningen. 18 - 19 December 2002. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- Tuinhof, A, Olsthoorn, T., Heederik, J.P. & de Vries, J. (2004). "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. A promising option to cope with increasing needs." Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- Tyler, S.W., Chapman, J.B., Conrad, S.H., Hammermeister, D.P., Blout, D.O., Miller J.J., Sully M.J. & Ginanni J.M. (1996). "Soil-water flux in the southern Great Basin, United States: temporal and spatial variations over the last 120,000 years." Water Resources 32(6):1481-1499.



- UNESCO. (1971). “*Scientific framework of world water balance.*” UNESCO Technical Papers, in Hydrology nº 7, 27 pp. Paris.
- UNICEF. (1999). “*Manual sobre el agua. Hacia una mejor programación.*” Directrices técnicas sobre Agua, Medio Ambiente y Saneamiento. Fondo de las Naciones Unidas para la infancia (UNICEF). 1999.
- UNTS. (1976). “*RAMSAR, 1971. Convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat.*” UNTS. Nº. 14.583. Vol. 996 (1976), pp. 243.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency (1992). “*Manual on Guidelines for Water Reuse.*” EPA/625/R-92/004, September 1992. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.
- Valdés, J.L. (1992). “*Experiencias de recarga artificial en los acuíferos del Río Llobregat y Río Besòs.*” Aguas de Barcelona (AGBAR), Barcelona
- Van Beek, C. (1986). “*Clogging of discharge wells in the Netherlands II: Causes and prevention.*” International Symposium of biofouled aquifers: prevention and restoration. American Water Works Association. Denver. Pp. 42-56.
- Van Beek, C., Hettinga F., Straatman, R. (1989). “*The effects of manure spreading and acid deposition upon groundwater quality in Vierlingsbeek, the Netherlands.*” Int Assoc Hydrol Sci Publ 185:155–162.
- Van Breemen, L. y Waals, J.M. (2002). “*Almacenamiento del agua de superficie en los Países Bajos: retos del futuro.*” IMU.-Ingeniería municipal. Marzo 2002.
- Van de Graaf A.A., Mulder A., De Bruyn P., Jetten M., Robertson, L.A., Kuenen, J.G. (1995). “*Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process.*” Appl Environ Microbiol 61(4):1246–1251.
- Van der Kooij, D., Vrouwenvelder, H.S. & Veenendaal, H.R. (1995). “*Kinetic aspects of biofilm formation on surfaces exposed to drinking water.*” *Water Sci. Tech*, 32(8): 61-65.
- Van buijvenbode, S.W. & Olsthoorn, T.N. (1998). “*Effects of natural channel bed filtration prior to deep well injection.*” Artificial recharge of groundwater, Peters,J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- Van Duijvenbode, S.W. & Olsthoorn, T.N. (2002). “*A pilot study of deep-well recharge by Amsterdam Water Suply.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Vanderzalm, J.L., Le Gal La Salle, C. & Hutson, J.L. (2002). “*Water quality changes during aquifer storage and recovery at Bolivar, South Australia.*” Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Veihmeyer, F.J. & Hendrickson, A.J. (1931). “*The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils.*” Soil Science 32:181–194.
- Villanueva, M. e Iglesias, A. (1984). “*Pozos y acuíferos. Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo.*” Instituto Geológico y Minero de España.
- Villarroja, F. (2002). “*El marco de la Directiva Marco.*” Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM-CY-II.
- Viñals, M.J. (1999). “*La variabilidad de las cubetas de los humedales mediterráneos: formas y procesos geomórficos.*” Humedales mediterráneos, 1, pp.91-98.
- Vorreyer, C. (1998). “*Delineating surface source water protection areas in Germany.*” Proceedings of Source water assessment and protection 98, Dallas, April 1998, p. 61-64.
- Waterloo software. (1999). “*Aqua-Chem. User’s manual.*” Ontario,Canadá.
- Waterloo hydrogeologic. (1999). “*Visual Modflow v.2.8.2, User’s Manual.*” Ontario, Canadá.
- Waterloo hydrogeologic. (2000). “*Whi Unsat Suite. User’s Manual, 2000.*” Ontario,Canadá.



- W.M. Edmunds, W.M. & Tyler, S.W. (2002). “*Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions.*” Hydrogeology Journal Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Walker, G., Zhang, L., Ellis, T.W., Hatton, T. and Petheram, C. (2002). “*Estimating impacts of changed land use on recharge: review of modelling and other approaches appropriate for management of dryland salinity.*” Hydrogeology Journal, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Waters, P., Greenbaum P, Smart L, Osmaston H. (1990). “*Applications of remote sensing to groundwater hydrology.*” Remote Sensing Rev 4:223–264.
- Williams, D.D. (1993). “*Nutrient and flow vector dynamics at the hyporheic/ groundwater interface and their effects on the interstitial fauna.*” Hydrobiologia 251:185–198.
- Williams, J.R., Berndt, H.D. (1977). “*Sediment yield prediction based on watershed hidrology.*” 1.100-1.104. Transaction of the A.S.A.E. Michigan.
- Winter, T.C., Harvey J.W., Franke, O.L., Alley, W.M. (1998). “*Groundwater and surface water. A single resource.*” US Geological Survey. Circ 1139.
- Winter, T.C. (1999). “*Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems.*” Hydrogeology Journal nº 7:28–45.
- Winter, T.C. (1983). “*The interaction of lakes with variably saturated porous media.*” Water Resour Res 19:1203–1218.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). “*Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning.*” Agricultural Handbook. nº 537. US.D.A. Washington D.C.
- Woessner W.W. (2000). “*Stream and fluvial plain groundwater interactions: rescaling hydrogeologic thought.*” Ground Water 38(3): 423–429.
- Wolery, T.J. (1983). “*EQ3NR, a computer program for geochemical aqueous speciation-solubility calculations, user’s guide and documentation.*” Lawrence Livermore Lab., Livermore, California, UCRL-53414, pp 191.
- Zhang, L., Dawes, W. & Walker, G. (1999). “*Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance.*” CRC for catchment Hydrology Technical Report 99/12. Australia.
- Zinke P.J. (1967). “*Forest interception studies in the United States.*” In: Sopper W.E. & Lull H.W. (eds). Forest hydrology. Pergamon Press, Oxford, pp 137–161. U.K.

URLs

- <http://caminos.udc.es/grupos/hg/2002.htm>
- http://hispagua.cedex.es/Grupo1/Tes_hidro/HTML/HID_R0.HTM
- <http://iucn.org/>
- <http://listserver.flinders.edu.au/mailman/listinfo/iah-mar.listcgs>
- <http://members.tripod.com/Arturobola/glosa.htm>
- <http://sic.uji.es/com/revista/200103/26/6545.pdf>
- <http://sic.uji.es/com/revista/200111/27/10638.pdf>
- <http://sofia.usgs.gov/sfrsf/rooms/hydrology/ASR/>
- <http://usuarios.lycos.es/Carcaman/tomo3.htm>
- <http://www.aeas.es/aeas/aeashome.htm>
- <http://www.ambientum.com/documents/revista/n13a.htm>
- http://www.asrforum.com/frames/wherefr.html***
- http://www.cedex.es/ceta/cetaweb/activ_ingam.htm
- <http://www.cgwaindia.com/success.htm>
- <http://www.cig.ensmp.fr/%7Ehubert/glu/ES/GF0084ES.HTM>
- <http://www.cig.ensmp.fr/%7Ehubert/glu/HINDEST.HTM>
- <http://www.clw.csiro.au/publications/technical2001/>
- http://www.csir.co.za/plsql/ptl0002/PTL0002_PGE038_ARTICLE?ARTICLE_NO=4760137
- <http://www.fao.org/docrep/w8594e>
- <http://www.geo.ign.es>
- <http://www.iah.org/News/2002/018.html>
- <http://www.iah.org/recharge>
- http://www.IGME.es/internet/web_aguas/igme/publica/con_recu_acuiferos/001.pdf
- <http://www.jcyl.es/jcyl-client/jcyl/cf/dgvuot/tkContent?idContent=5038>
- http://www.jcyl.es:8080/ora_riac/plsql/inforiego
- http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/clima_atmosfera/infgem/sicam1_2.html
- <http://www.medicina.unal.edu.co>
- http://www.mma.es/info_amb/act_pub/pdf/2_informes.pdf
- http://www.nwl.ac.uk/gwf/asr/asr_intro.htm
- <http://www.programanthos.org/inicio.asp>
- <http://www.terralia.com/revista15/pagina39.htm>
- <http://www.trentu.ca/library/archives/masterstheses.htm>
- <http://www.trentu.ca/wsc/research.shtml>
- http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC03__001.pdf
- http://www.unesco.org.uy/phi/libros/uso_eficiente/silgado.html
- www.agua.uji.es/pdf/leccionRH27.pdf
- www.uji.es/com/revista/2001/03/26



APÉNDICE 2. GLOSARIO

GLOSARIO

Acuífero. Formación permeable capaz de almacenar y transmitir cantidades aprovechables de agua.

Acuífero colgado. Masa de agua subterránea, generalmente de dimensiones moderadas, situada sobre un estrato relativamente impermeable, y que está localizada entre un nivel freático y la superficie del terreno.

Acuífero libre. Acuífero que contiene agua con una superficie piezométrica libre y presenta una zona no saturada.

Acuífero semiconfinado. Un acuífero parcialmente confinado por capas de suelo de menor permeabilidad a través del cual la descarga y recarga puede todavía ocurrir.

Acuífugo. Formación sin intersticios interconectados y, por tanto, incapaz de absorber o transmitir agua.

Acuitardo. Formación geológica de naturaleza algo impermeable y semiconfinada, que transmite agua en proporción muy pequeña en comparación con un acuífero.

Adsorción. Separación de líquidos, de gases, de coloides o de materia suspendida en un medio por adherencia a la superficie o a los poros de un sólido. Este fenómeno es típico en la superficie del carbón activado, cuando se usa para la eliminación de sustancias orgánicas disueltas y el cloro.

Agente. Elemento concreto que, en su actuación, produce un efecto. En geomorfología son sujetos causales del modelado del relieve (agua, nieve, hielo, viento, etc).

Agentes Quelantes. Son compuestos orgánicos que extraen ciertos iones disueltos en el agua, incorporándolos a su estructura.

Agua freática. Agua subterránea que se presenta en la zona de saturación y que tiene una superficie libre.

Aguas residuales. Fluidos residuales en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja, o industria que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.

Agua subterránea. Agua del subsuelo que ocupa la zona saturada.

Alcalinidad. La alcalinidad significa la capacidad tapón del agua; la capacidad del agua de neutralizar. Evitar que los niveles de pH del agua lleguen a ser demasiado básico o ácido. Es También añadir carbón al agua. La alcalinidad estabiliza el agua en los niveles del pH alrededor de 7. Sin embargo, cuando la acidez es alta en el agua la alcalinidad disminuye, puede causar condiciones dañinas para la vida acuática. En química del agua, la alcalinidad se expresa en ppm o el mg/l de carbonato equivalente del calcio. La alcalinidad total del agua es la suma de las tres clases de alcalinidad; alcalinidad del carbonato, del bicarbonato y del hidróxido.

Alícuota (véase parte alícuota).



Alimentación artificial. Aumento de la alimentación natural de agua subterránea a los acuíferos o embalses de agua subterránea suministrando agua a través de pozos, inundando o cambiando las condiciones naturales.

Alimentación de un acuífero. Aportes de agua de cualquier procedencia a un acuífero.

Almacenamiento. Volumen de agua almacenado.

Altura piezométrica. Altura a la que subirá el agua en un piezómetro conectado a un punto de un acuífero.

Ángstrom. Unidad de medida igual a 10^{-10} metros.

Anión. Un ion cargado negativamente que resulta de la disociación de sales, de ácidos o de álcalis en la solución

Área de influencia. Superficie que rodea un pozo de bombeo o de recarga en el que el nivel freático (en acuíferos libres) o la superficie piezométrica (en acuíferos confinados) se eleva o disminuye en grado significativo por bombeo o recarga.

Barranco. Cauce profundamente erosionado por el agua, que fluye sólo por escorrentía de tormentas y/o durante el deshielo.

Biotopo. Término ecológico que significa una unidad ambiental definida.

Boqueras. Tomas de ríos o torrentes seguidas de pequeñas acequias que ocasionalmente llevan gran cantidad de agua y la conducen a las parcelas cercanas a los cauces.

Capacidad de campo. Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica.

Capilaridad. Fenómeno asociado con la tensión superficial de los líquidos, particularmente en tubos capilares y medios porosos en los que se reúnen interfaces gaseosas, líquidas y sólidas.

Careo. Práctica que consiste en guiar el agua por lugares de poca pendiente para permitir su filtración con el objetivo de que parte de esa agua sea posteriormente utilizada en las zonas de surgencias.

Carstificación. Proceso que genera una morfología cárstica, por disolución de calizas o yesos.

Catión. Ión de carga negativa, resultado como la disolución de moléculas en agua.

Cloración. Proceso de purificación del agua en el cual el cloro es añadido al agua para desinfectarla, para el control de organismos presente. También usado en procesos de oxidación de productos impuros en el agua.

Cloro. Un elemento químico que se utiliza para matar microorganismos presentes en el agua. A temperatura ambiente y presión atmosférica es un gas amarillo.

Cloro Residual. Porción del cloro libre o combinado, que permanece activo después de un periodo de tiempo especificado.

Coefficiente de almacenamiento. Volumen de agua liberado o añadido a un acuífero por unidad de superficie del acuífero y por unidad de variación de carga hidráulica.

Coefficiente de almacenamiento específico. Cantidad de agua drenada del suelo por unidad horizontal de superficie y unidad de descenso de nivel.



Coefficiente de Darcy. Valor numérico que expresa la conductividad hidráulica.

Coloides. Son partículas muy pequeñas, de 10 a 1000 Ångstrom, que no se sedimentan si no son coaguladas previamente. Tienen una carga negativa y fácilmente obstruyen las membranas y los sistemas de ablandamiento y desionización.

Conductividad eléctrica. Es una medida de la habilidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medición es el siemen/centímetro

Conductividad hidráulica. Propiedad combinada de un medio poroso y saturado y del fluido que lo atraviesa, que determina la relación, llamada ley de Darcy, entre el caudal específico y el gradiente hidráulico que lo origina.

Desnitrificación. Eliminación de productos nitritos y nitratos del agua para producir una calidad que responda a los estándares comunes.

Dureza. Es la presencia de sales de calcio y magnesio en el agua. La dureza disminuye la capacidad del jabón de producir espuma. Una alta dureza causa problemas de incrustación en calderas y tuberías e interfiere en procesos de purificación por ósmosis inversa.

Dureza total. La suma de la dureza del calcio y el magnesio, expresada como carbonato cálcico equivalente.

Dureza del carbonato. Dureza del agua causada por el carbonato y el bicarbonato por productos de calcio y magnesio.

Endorreico. Drenaje en cuencas cerradas.

Ensayo de bombeo. Bombeo de agua de un pozo con uno o más caudales previamente elegidos, durante el cual se miden regularmente los niveles piezométricos en el pozo de bombeo y en pozos de observación cercanos. Los datos se utilizan para determinar los parámetros del acuífero en las proximidades del pozo de bombeo.

Escherichia coli (E. coli)

Bacteria coliforme que está a menudo asociada con el hombre y desechos a animales y es encontrada en el intestino. Es usada por departamentos de salud y laboratorios privados para medir la calidad de las aguas.

Escorrentía. Parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo en un curso de agua.

Espectroscopía de absorción Atómica. Una técnica de análisis instrumental, altamente sensible, para analizar e identificar metales en el agua.

Estratigrafía. El estudio de las rocas estratificadas; especialmente su sucesión en el tiempo, la naturaleza de las mismas y la correlación de los estratos en diferentes lugares.

Estrato. Sinónimo de capa. Cuando las capas se disponen en sucesivos estratos se dice que están estratificadas.

Facies. Suma total de caracteres, tales como tipo de roca, contenido mineral, rasgos de estratificación, que caracterizan a un sedimento o roca.

Flujo de aguas subterráneas. Movimiento del agua en un acuífero.



Gradiente hidráulico. En medio poroso, la disminución de la altura piezométrica por unidad de distancia en la dirección del flujo.

Groundwater depletion. (G.D.). Término técnico que representa el descenso del nivel dinámico del pozo cuando entra en control lateral con la fuente de recarga.

Hábitat. Medio en el que vive una planta o animal. El término se aplica, generalmente, al medio al que el organismo está más sólidamente adaptado.

Hidrogeología. Rama de la geología que estudia las aguas subterráneas, y especialmente su formación.

Hidrogeoquímica. Ciencia que estudia la composición química de las aguas naturales, sus cambios y las causas de los mismos.

ICP MS. Espectometría de masas de plasma acoplado inductivamente. Permite determinar la concentración de elementos traza mediante el análisis de elementos en digestión

Indicador. Cualquier entidad biológica o proceso, o comunidad cuyas características muestren la presencia de las condiciones ambientales específicas o contaminación.

Índice de Langelier. Medida del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, alcalinidad y dureza. Si el índice de Langelier es positivo, el carbonato de calcio puede precipitar de una solución y formar incrustaciones.

Índice de Ryznar. Medida del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, alcalinidad y dureza. Si el índice de Ryznar tiene un valor de 6,0 o menor, el agua tiene tendencia incrustante, con un índice de 7,0 la incrustación no ocurre. Cuando el valor aumenta a valores superiores de 7,5 a 8,5, se incrementa el problema de la corrosión.

Infiltración. Flujo de agua que penetra en un medio poroso a través de la superficie del suelo.

Intercambio Iónico. También conocido como desionización, Es un proceso por el cual ciertos iones no deseados, son cambiados por otros iones deseados que están unidos a las partículas de una resina. Normalmente los iones hidrógeno de la resina, se cambian por los cationes y los iones hidroxilo de la resina, se cambian por los aniones. Los iones hidrógeno e hidroxilo, se combinan, formando agua pura.

Ión. Un átomo o grupo de átomos con una carga positiva (catión) o una negativa (anión), como resultado de haber perdido o ganado electrones.

Isopieza freática. Línea que une todos los puntos de un nivel freático que tienen la misma cota por encima de una cota de referencia.

Ley de Darcy. Fórmula que expresa la proporcionalidad entre el caudal específico de un líquido que fluye a través de un medio poroso y el gradiente hidráulico, en régimen laminar (números bajos de Reynolds).

Límite hidrogeológico. Discontinuidad lateral en la estructura geológica, que marca la transición del terreno permeable de un acuífero, a otro terreno de propiedades hidrogeológicas sensiblemente diferentes.

Línea (o superficie) equipotencial. Línea (o superficie) a lo largo de la cual el potencial es constante.

Línea (o superficie) isopieza. Línea (o superficie) que une los puntos de igual altura piezométrica.



Limnología. El estudio de aspectos físicos, químicos, hidrológicos y biológicos del agua dulce.

Litología. Tipo de roca o de sedimento.

Metal pesado. Metal que tiene una densidad de 5.0 o mayor y elevado peso elemental. La mayoría son tóxicos para el ser humano, incluso a bajas concentraciones.

Microorganismos. Organismos que son tan pequeño que sólo pueden ser observado a través del microscopio, por ejemplo bacterias, fungi, levaduras, etc.

Miliequivalente. Es la concentración equivalente que reaccionaría con un miliequivalente de otra sustancia. En cálculos de análisis de agua, se emplea la Normalidad como unidad de concentración de las soluciones que se utilizan para llevar a cabo las reacciones de titulación $N = \text{eq/l}$ o $N = \text{meq/ml}$.

Nitrificación. Proceso biológico, durante el cual bacterias nitrificantes convierten el amoníaco tóxico en nitrato para disminuir su efecto dañino. Esto es comúnmente utilizado para eliminar sustancias de nitrógeno de las aguas residuales, pero en lagos y en pantanos esto ocurre de forma natural.

Nivel de agua estático. Altura del nivel freático o de la superficie piezométrica, cuando no está influida por bombeo o recarga.

Nivel freático. Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica.

Ósmosis. Es la difusión de un solvente a través de una membrana semipermeable, el flujo es de la parte con menos concentración a la parte con mayor concentración.

Parámetro. Una variable, propiedad medible cuyo valor está determinado por las características del sistema en el caso del agua por ejemplo, estas pueden ser la temperatura, la presión, la densidad, etc.

Parte alícuota. Una porción de una muestra tomada para el análisis. Unas o más partes alícuotas forman una muestra.

pH. Es el logaritmo base 10 de la actividad molar de los iones hidrógeno de una solución. Es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado por el número de iones de hidrógeno presente. Es medido en una escala desde 0 a 14, en la cual 7 significa que la sustancia es neutra. Valores de pH por debajo de 7 indica que la sustancia es ácida y valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica.

Piezómetro. Pozo de observación en el que se pueden medir el nivel freático o la altura piezométrica.

Pontiense. Nombre del piso estratigráfico del Plioceno Inferior europeo (sistema terciario).

Precipitado. Cuando una solución llega a su saturación, el soluto empieza a "salir" de la solución, en forma de precipitado. De esta forma, el carbonato de calcio precipita del agua, causando incrustaciones.

Punto de marchitez permanente. Es el grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno.

Quelante –agentes- (o quelatos). Compuestos orgánicos que tienen la habilidad de atrapar iones que están disueltos en el agua convirtiéndolos en sustancias solubles.



Potencial de oxidación-reducción. Potencial eléctrico requerido para transferir electrones desde un oxidante a un reductor, usado como medida cualitativa del estado de oxidación en los sistemas de tratamiento de agua.

Presión parcial. Presión que ejerce un gas en un líquido, el cual está en equilibrio con la solución. En una mezcla de gases, la presión parcial de algún gas es tantas veces la presión total de la fracción del gas en la mezcla (por volumen o número de moléculas).

Proceso. Nombre genérico para los fenómenos involucrados en la actividad geodinámica.

Recarga de un acuífero. Proceso por el cual se aporta agua del exterior a la zona de saturación de un acuífero, bien directamente a la misma formación o indirectamente a través de otra formación.

Red de drenaje. Disposición de los cauces de drenaje, naturales o artificiales, de una zona.

Redox. Término abreviado para las reacciones de reducción/ oxidación. Reacciones redox son una serie de reacciones de sustancias en las cuales la transferencia de electrones tiene lugar. La sustancia que gana electrones es llamada agente oxidante.

Rezume. Agua que emerge del terreno a lo largo de una línea o superficie.

Salinidad

La presencia de minerales solubles en el agua.

Salinidad. Es la concentración de las sales minerales solubles en el agua (principalmente, de los metales como el sodio, magnesio y calcio).

SAT (Soil Aquifer Treatment). Denominación genérica para aquellas técnicas que se aplican en el agua de recarga y/o medio receptor para aumentar la efectividad de las instalaciones de recarga artificial superficial y/o profunda.

Saturación. La condición de un líquido cuando toma de la solución la mayor posible cantidad de una sustancia dada.

Siemen. Unidad de medida de la conductancia, es el recíproco de la resistencia en Ohms.

Sinergismo. La acción combinada de varias sustancias químicas, las cuales producen un efecto total más grande que el efecto de cada sustancia química separadamente.

Sólidos totales disueltos. Es la concentración total de los iones disueltos, expresada en unidades de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o en ppm de NaCl o de Na_2SO_4 .

Solubilidad. La cantidad de masa de un compuesto que puede disolverse por unidad de volumen de agua.

Superficie potenciométrica. La superficie para la cual el agua de en un acuífero puede aumentar por la presión hidrostática.

Surgencia. Fuente o manantial.

Total de sólidos disueltos (TSD). El peso por unidad de volumen de agua de sólidos suspendidos en un medio de filtro después de la filtración o evaporación.

Turbidez. Es una suspensión de partículas muy finas, que obstruye el paso de la luz. Por el pequeño tamaño de estas partículas, se requieren muchos días para que se sedimente. Medida de la no transparencia del agua debida a la presencia de materia orgánica suspendida.



Umbral de escorrentía (UE). Tiempo durante el cual las aportaciones a una cuenca presentan una curva de concentración ascendente.

Unidad Tectosedimentaria (UTS). Una UTS elemental se define como “una unidad estratigráfica constituida por una sucesión de estratos (no necesariamente conformes) depositados dentro de un intervalo de tiempo geológico concreto y bajo una dinámica sedimentaria y tectónica de polaridad definida” (Garrido Megias, 1982). Este autor establece diferentes categorías de UTSs, y apunta a que sus límites naturales, sea cual sea su categoría, están materializados por rupturas o discontinuidades de extensión equiparable a la cuenca.

Vindoboniense. Nombre del piso estratigráfico del Mioceno Medio europeo (sistema terciario).

Water Table fluctuation (WTF). Método del balance volumétrico, que incorpora el método.

Zona no saturada (ZNS). La zona por encima del nivel piezométrico donde los poros del suelo no están totalmente llenos de agua.

Zona saturada (ZS). El área por debajo del nivel piezométrico donde todos los espacios abiertos están llenos de agua.



APÉNDICE 3. REPORTAJE FOTOGRÁFICO

LEYENDA DE LAS FOTOGRAFÍAS

1. Cartel informativo sobre las obras de interés general ejecutadas por el Grupo Tragsa con un presupuesto de 622 millones de pesetas.
2. Afloramiento de materiales terciarios el noreste de Santiuste de San Juan Bautista. Esta colina recibe el topónimo “Cuerno de la Revilla”.
3. Cartel informativo de las obras de captación y distribución de agua potable debido a la detección de arsénico en las aguas subterráneas.
4. Afloramiento de materiales terciarios diseccionando la *Cubeta* en sus sectores Este y Oeste.
5. Las norias movidas por acémilas han constituido el sistema de riego tradicional hasta la implantación de la bomba.
6. Pozo telescópico característico de la zona de estudio, con interesantes posibilidades para su empleo como complemento de la recarga artificial de acuíferos.
7. Los pozos de gran diámetro excavados con retroexcavadora y revestidos con ladrillo son las captaciones más habituales en la *Cubeta*.
8. El regadío mediante pivots se ha convertido en un sistema cada vez más implantado, especialmente en las zonas donde se ha llevado a cabo la concentración parcelaria, como Villeguillo.
9. Control de los parámetros inestables en puntos de agua relacionados con humedales (Ciruelos de Coca, febrero de 2002).
10. Antigua captación para abastecimiento de agua potable en Villeguillo, actualmente en desuso.
11. Como consecuencia del descenso del nivel freático al aumentar el volumen extraído para regadío, las fuentes y pozos que había dispersos por la zona se secaron, como es el caso del *Pozo Bueno* en Ciruelos de Coca.
12. Talud del río Voltoya a su paso por Santiuste de San Juan Bautista. El nivel de base lo constituyen las facies Cuestas. Sobre ellas hay aportaciones difusas del acuífero al río a través de las arenas de la Fm Arévalo.
13. Un nuevo caso de pozo abandonado en Llano de Olmedo. Verano de 2003.
14. El río Voltoya en el Puente de moraleja de Coca a Navas de la Asunción (extremo sur de la zona de estudio).
15. La extracción de resina es una de las actividades más emblemáticas llevadas a cabo en los pinares de la *Cubeta*.
16. Pozo de gran diámetro representativo de las perforaciones en la cubeta.
17. Pozo-sondeo. Se trata de un pozo de gran diámetro con un sondeo perforado en su interior, al haber quedado colgado el nivel del agua.
18. Pozo telescópico de gran diámetro con ladrillos y anillos de hormigón.
19. Minisondeo y extracción de agua para regadío con bomba de eje vertical.
20. Obras del caz de recarga. Afloramiento de una terraza fluvial del arroyo de la Ermita.
21. Foto similar a la anterior. Junto a la carretera de Villagonzalo a Coca.
22. Foto similar a la anterior (dirección opuesta). En ella se aprecia un dispositivo de parada de hormigón.
23. Bodón *Guarrero* (Villeguillo). Mayo de 2002.
24. Bodón de *La Cárcava*. Mayo de 2002.
25. Bodón *El Arenero*. Junio de 1999.
26. Bodón *La Dehesilla*. Mayo de 2002.
27. Laguna de la Iglesia. Febrero de 2002.
28. Bodón de Ciruelos de Coca.



29. La presencia de tendidos de alta tensión es una constante en las zonas regables para el empleo de grupos electrobomba. Ciruelos de Coca.
30. La laguna de las Eras, en Villagonzalo de Coca. Es un Espacio Natural Protegido autonómico que puede ser restaurado mediante operaciones de recarga artificial.
31. Acumulaciones de estiércol para abonado en el sector este de la *Cubeta*.
32. Mezcla de agroquímicos (epsomita) a boca de pozo. Villeguillo.
33. El regadío mediante aspersores es el sistema más común en la *Cubeta*.
34. Obras de excavación del caz de recarga al sureste de la *Cubeta*.
35. Obras de excavación del caz de recarga al sur de Villeguillo.
36. Vertedero de animales muertos en la carretera de Santiuste al antiguo apeadero de Coca.
37. Sustrato salino de la laguna de la Iglesia (Villagonzalo de Coca). Febrero de 2002.
38. Ejemplo de un sondeo con descuelgue de aguas del acuífero superior hacia el inferior (acuífero colgado).
39. Captación n.º ocho de la Red de Control de la piezometría.
40. Explanación en una zona incendiada para el trazado del TAV Madrid-Valladolid frente al vertedero clausurado de Coca.
41. El castillo de Coca. Símbolo emblemático de la *Cubeta*.
42. Pozo deteriorado en una zona de labor con presencia de granjas de ganado porcino. Santiuste de San J&B.
43. Explotación de un pozo y presencia de granjas ganaderas en el sector meridional de la *Cubeta*.
44. Obras del caz de recarga en el Sanchón.
45. En las fiestas patronales de Santiuste de San J&B se lleva a cabo una exposición de fotos antiguas, en la que es frecuente encontrar indicios del pasado “hídrico” de la *Cubeta*. Un ejemplo son los pozos ya secos y las fuentes que han dejado de manar y que actualmente están conectadas a la red de abastecimiento municipal, como es el caso. Fotografía de inicios del siglo XX.
46. Fuente seca en Llano de Olmedo.
47. Pozo seco en Villagonzalo de Coca. Al fondo la Laguna de las Eras.
48. Zona de transición entre los cultivos y los pinares (unidades ambientales cultivo y forestal).
49. Cultivo hortícola castigado por la helada en enero de 2002. Santiuste de San J&B.
50. Un nuevo ejemplo de pozos secos en Llano de Olmedo.
51. Cabecera del caz de recarga e inicio del dispositivo. En la garita ha sido instalado un caudalímetro. Marzo de 2004.
52. Detalle de la cabecera del caz de recarga y placa conmemorativa de su inauguración.
53. Zona revestida del caz con una estructura de paso y regadío con aspersores en sus inmediaciones.
54. Ampliación provisional del caz de recarga al norte de Villeguillo en el invierno de 2004. Su trazado coincide con el de una antigua acequia que regaba las huertas comunales.



01.jpg



02.jpg



03.jpg



04.jpg



05.jpg



06.jpg



07.jpg



08.jpg



09.jpg



10.jpg



11.JPG



12.jpg



13.JPG



14.jpg



15.JPG



16.jpg



17.jpg



18.jpg



19.jpg



20.jpg



21.jpg



22.jpg



23.jpg



24.jpg



25.jpg



26.jpg



27.jpg



28.jpg



29.JPG



30.JPG



31.JPG



32.jpg



33.JPG



34.jpg



35.jpg



36.jpg



37.jpg



38.jpg



39.jpg



40.jpg



41.jpg



42.jpg



43.jpg



44.jpg



45.JPG



46.JPG



47.JPG



48.JPG



49.jpg



50.JPG



51.JPG



52.JPG



53.JPG



54.JPG

ÍNDICE DE ANEXOS

BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN

ANEXO 1.1.- ANÁLISIS DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE

ANEXO 1.2.- DEMOGRAFÍA Y PATRIMONIO DE LA ZONA DE ESTUDIO

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.1. LINEAMIENTOS DEDUCIDOS POR FOTOINTERPRETACIÓN

ANEXO 2.2. PROSPECCIÓN. DATOS DIRECTOS E INDIRECTOS

ANEXO 2.3. DATOS MESOESTRUCTURALES

ANEXO 2.3.1. Datos mesoestructurales obtenidos en la estaciones geomecánicas y fotografías

ANEXO 2.3.2. Índice de gradiente del thalweg (SI) e índice de sinuosidad de escarpes (Vf). Datos de cálculo

ANEXO 2.3.3. Estudio del relieve mediante derivadas direccionales. metodología y cartografías

ANEXO 2.4. DATOS CLIMÁTICOS Y BALANCE HÍDRICO

ANEXO 2.4.1. Datos climáticos. Estación 2502, Santiuste de San Juan Bautista

- Precipitación mensual
- Temperatura

ANEXO 2.4.2. Balance hídrico. Cálculo por los métodos directo y exponencial

ANEXO 2.5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

ANEXO 2.5.1. Perfiles hidrogeológicos

ANEXO 2.6. PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y BAREMOS DE CLASIFICACIÓN

ANEXO 2.7. REDES DE CONTROL

ANEXO 2.7.1. Red de Control de la Piezometría (RCP)

ANEXO 2.7.2. Red de Control de la Recarga (RCR)



BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

ANEXO 3-1 AGUAS

ANEXO 3.1.1. Polos fríos del sistema

3.1.1.1/2. Resultados analíticos/parámetros inestables

3.1.1.3. Caracterización

ANEXO 3.1.2. Red de Control de la Hidroquímica. Fase preoperacional (RCH-1999)

3.1.2.1. Resultados analíticos

3.1.2.2. Determinación de parámetros inestables

3.1.2.3. Caracterización

3.1.2.4. Cartografía temática. mapas de isocontenidos” para el acuífero superficial

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ion Cl^-
- Distribución de la concentración de ion NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$
- Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$

3.1.2.5. Cartografía temática . Mapas de isorrelaciones iónicaS

- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

ANEXO 3.1.3. Red de Control de la Hidroquímica Fase Sinoperacional (RCH-2003)

3.1.3.1. Resultados analíticos

3.1.3.2. Determinación de parámetros inestables

3.1.3.3. Caracterización

3.1.3.4. Cartografía temática. mapas de isocontenidos para el acuífero superficial

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ion Cl^-
- Distribución de la concentración de ion NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$
- Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$

3.1.3.5. Cartografía temática . Mapas de isorrelaciones iónicas



- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

3.1.3.6. Cartografía temática . Mapas de isovariaciones de isocoras e isorrelaciones iónicas entre 1999 y 2003

- Distribución de conductividad
- Distribución de la concentración de ion Cl^-
- Distribución de la concentración de ion NO_3^-
- Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)
- Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)
- Distribución de la concentración de CO_3H^- y CO_3^{--}
- Distribución de ion SO_4^{--}
- Relación iónica magnesio/calcio
- Relación iónica potasio/sodio
- Relación iónica cloruro/bicarbonato
- Relación iónica sulfato/cloruro

ANEXO 3.1.4. Puntos adecuados para la caracterización de ambientes. Fase postoperacional

3.1.4.1. Resultados analíticos

3.1.4.2. Determinación de parámetros inestables

3.1.4.3. Cartografía temática. Mapas de isocontenidos para el acuífero superficial

- Conductividad
- Hierro total
- Nitratos

3.1.4.4. Cartografía temática. Mapas de isorelaciones iónicas

- Nitratos/oxígeno disuelto
- Hierro total/oxígeno disuelto

ANEXO 3.1.5. Humedales del Complejo Coca-Olmedo

3.1.5.1. Inventario y tipificación

3.1.5.2. Resultados analíticos

3.1.5.3. Determinación de parámetros inestables

ANEXO 3.1.6. Perfiles hidroquímicos

ANEXO 3.2. SUELOS

ANEXO 3.2.1. Testificación detallada de los testigos de las perforaciones



ANEXO 3.2.2. Resultados analíticos

ANEXO 3.2.3. Ensayos granulométricos de las muestras de arena

3.2.3.1. *Curvas granulométricas*

ANEXO 3.2.4. Estudio textural. Observación con lupa binocular

3.2.4.1. *Documentación gráfica*

ANEXO 3.2.5. Estudio textural y composicional. Observación con microscopio de luz polarizada

3.2.5.1. *Documentación gráfica*

ANEXO 3.3. RESUMEN DE RESULTADOS DEL CÓDIGO PHREEQC DE MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.1.- INVENTARIO EXHAUSTIVO DE HUMEDALES

ANEXO 4.1.1. Inventario tabulado de humedales en la zona de estudio

ANEXO 4.1.2. Resumen gráfico

ANEXO 4.2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS HUMEDALES

ANEXO 4.2.1. Tabla general

ANEXO 4.2.2. Fotografías aéreas de los humedales y zona de influencia

ANEXO 4.3.- FICHAS DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4.4.- IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS Y CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4.4.1. Listados de identificación y chequeo de impactos

ANEXO 4.4.2. Fichas de caracterización inicial de los humedales en la zona de estudio. Laguna de las Eras, Laguna de la Iglesia y Laguna Caballo Alba

ANEXO 4.5.- APLICACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES

ANEXO 4.5.1. Indicadores medioambientales de presión

ANEXO 4.5.2. Indicadores medioambientales de estado

ANEXO 4.5.3. Indicadores medioambientales de respuesta

ANEXO 4.6.-POLÍGONOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA DEFINIR EL ESTADO INICIAL Y EVOLUCIÓN DE LOS HUMEDALES COMO CONSECUENCIA DE LAS OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL.



BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN

ANEXO 1.1.- ANÁLISIS DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE



NORMATIVA LEGAL

Marco legal de la recarga de acuíferos

En este apartado se presenta un estudio de las principales disposiciones legales relativas a la actividad en curso, la recarga artificial del acuífero con aguas superficiales. Se estudian además los aspectos legislativos relativos a la recuperación de humedales degradados aplicando esta tecnología.

La cuestión relativa a si la recarga artificial puede ser considerada un vertido ha sido analizada en detalle, al haber en la legislación específica regulaciones suficientes para tal atribución.

La ley de aguas, en su artículo 40, relativo a los Planes Hidrológicos de cuenca, dictamina la obligatoriedad de incluir un inventario de los recursos hidráulicos (a), constituyendo las labores de recarga un recurso. También las características básicas de calidad de las aguas y de la ordenación de los vertidos de aguas residuales, así como las directrices para recarga y protección de acuíferos (i).

En el artículo 89 prohíbe efectuar vertidos directos o indirectos que contaminen las aguas (a) y efectuar acciones sobre el medio físico o biológico afecto al agua, que constituyan o puedan constituir una degradación del mismo (c). En este sentido, la recarga artificial puede quedar integrada en el contexto de los vertidos, ya que, aunque se trate de un vertido no contaminante, puede propiciar acciones negativas sobre el medio, al movilizar iones en la zona no saturada del suelo, que se manifiestan como un vertido a corto o incluso medio plazo, pero pueden ser beneficiosos a un plazo mayor. Por tanto, requiere autorización administrativa (Artículo 92) y un estudio hidrogeológico previo que demuestre su inocuidad (Artículo 94).

La revisión de la Ley de Aguas, en su artículo Trigésimo cuarto, modifica la redacción del Artículo 92, con el siguiente contenido:

1. A los efectos de la presente Ley, se considerarán vertidos los que se realicen directa o indirectamente en las aguas continentales así como en el resto del dominio público hidráulico, cualquiera que sea el procedimiento o técnica utilizada. Queda prohibido con carácter general el vertido directo o indirecto de aguas y de productos residuales susceptibles de contaminar las aguas continentales o cualquier otro elemento del dominio público hidráulico, salvo que se cuente con la previa autorización administrativa.
2. La autorización de vertido tendrá como objeto la consecución del buen estado ecológico de las aguas, de acuerdo con las normas de calidad, los objetivos ambientales y las características de emisión e inmisión establecidas reglamentariamente en aplicación de la presente Ley. Esas normas y objetivos podrán ser concretados para cada cuenca por el respectivo plan hidrológico.

El Reglamento de la Ley de Aguas, define el concepto: "se entiende por vertido directo el realizado inmediatamente sobre un curso de aguas o canal de riego, y por vertido indirecto el que no reúna esta circunstancia, como el realizado en azarbes, alcantarillado, canales de desagüe y pluviales" ("Artículo 245. 2).

En el Artículo 251 define que en las autorizaciones de vertido se concretará especialmente:

a) Los límites cuantitativos y cualitativos del vertido. Estos últimos no podrán superar los valores contenidos en la Tabla 1 del anexo al Título IV, salvo en aquellos casos en que la escasa importancia del efluente permita, justificadamente, un menor rigor.

El Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio RDPH, en su artículo 238, determina que *"Los estudios de evaluación de efectos medioambientales contenidos en las peticiones de concesiones o autorizaciones, como documentos que forman aparte de los correspondientes expedientes, se verán sometidos a la tramitación normal regulada para éstos, debiendo ser recabados los informes correspondientes, en relación con la afección a la salud o al medio ambiente, si por la índole de la obra o acción previstas por el peticionario, así lo estimara el Organismo de cuenca"*.

En este caso, de acuerdo con la información consultada, en las operaciones de recarga artificial de acuíferos hay que tener en consideración las disposiciones legales relativas a vertidos líquidos.

Con todo lo expuesto, se considera aclarada tal atribución: la recarga artificial puede y debe ser considerada un vertido, en sentido amplio.

En cuanto a la recarga artificial, bien sea directa o inducida en humedales, debe ser considerada atendiendo a la normativa de protección de zonas húmedas, además de la legislación específica en materia de aguas. A este respecto, la Constitución Española de 1978, proclama en su artículo 45 que los poderes públicos deben velar *"por la utilización racional de todos los recursos naturales, con el fin de proteger y mejorar la calidad de vida, así como, defender y restaurar el medio ambiente"*. En este sentido, la Ley de Aguas sienta el principio de la *"compatibilidad de la gestión pública del agua con la ordenación del territorio, la conservación y protección del medio y la restauración de la Naturaleza"*.

En relación a los humedales, los Capítulos V del Título V de la Ley de Aguas (art.103) y el Capítulo V del Título III del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (arts. 275 a 283), llevan por título "De las zonas húmedas".

La Ley de Aguas, hace una escueta definición de *zonas húmedas*, englobando en este término a zonas pantanosas o encharcadas, incluso a las creadas artificialmente. El Reglamento del Dominio Público Hidráulico amplía esta definición ya que incluye dentro del concepto de zona húmeda a:

- *Las marismas, turberas o aguas rasas, permanentes o temporales, estén integradas por aguas remansadas o corrientes ya se trate de aguas dulces, salobres o salinas, naturales o artificiales.*
- *Las márgenes de dichas aguas y las tierras limítrofes en aquellos casos en que, previa la tramitación del expediente administrativo oportuno, fuera así declarada, por ser necesario para evitar daños graves a la fauna y a la flora.*

Debido a que el presente proyecto se centra en la recarga del acuífero, y este proceso está considerado a efectos legales como un vertido, se enuncian a continuación los artículos que hacen referencia en algunos de sus aspectos al concepto "vertido" tanto de la ley de aguas como del reglamento del Dominio Público Hidráulico.

El RDPH, en su Artículo 246, de carácter procedimental, determina que *“1. El procedimiento para obtener la autorización administrativa a que se refiere el artículo 92 de la Ley de Aguas se iniciará mediante la presentación de una solicitud por el titular de la actividad, que además de comprender los datos señalados en el artículo 69 de la Ley de Procedimiento Administrativo, contendrá al menos los siguientes extremos:*

- a) Características detalladas de la actividad causante del vertido.*
- b) Localización exacta del punto donde se produce la evacuación, inyección o depósito de las aguas o productos residuales.*
- c) Características cuantitativas y cualitativas de los vertidos.*
- d) Descripción sucinta de las instalaciones de depuración o eliminación, en su caso, y de las medidas de seguridad en evitación de vertidos accidentales.*
- e) Petición, en su caso, de imposición de servidumbre forzosa de acueducto o de declaración de utilidad pública a los efectos de expropiación forzosa”.*

A las disposiciones en materia de aguas hay que añadir la legislación específica medioambiental nacional, siempre y cuando la legislación autonómica aplicable no sea menos restrictiva.

Tras esta amplia introducción, el apartado se ha desglosado en dos bloques: un análisis legislativo de las disposiciones que afectan a la recarga artificial, procediendo al análisis léxico-gráfico de las principales disposiciones, y un segundo bloque, de carácter aplicado, relativo a las zonas húmedas. Para terminar se alude a procedimientos administrativos vinculados con la recarga artificial en la cubeta de Santiuste.

NORMATIVA GENERAL

Las principales disposiciones se mencionan a continuación, ordenadas en orden cronológico en dos bloques: relativas a las aguas y al medio ambiente:

AGUAS

- **Directiva del Consejo 76/464 CEE, de 4 de mayo de 1976, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad (DOCE núm. L 129, de 18 de mayo de 1976).**

- **Directiva del Consejo 80/68/CEE, de 17 de diciembre de 1979, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas (DOCE núm. L 20, de 26 de enero de 1980).**
- **Ley 29/85 de 2 de agosto, de aguas (BOE núm. 189, de 8 de agosto de 1985; corrección de errores BOE núm. 243, de 10 de octubre de 1985).**
- **Reglamento del Dominio Público Hidráulico RD 849/1986 de 11 de abril.**
- **Real Decreto 2618/1986, de 24 de diciembre, por el que se aprueban medidas referentes a acuíferos subterráneos al amparo del artículo 56 de la Ley de Aguas (BOE núm. 312, de 30 de diciembre de 1986).**
- **Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los Ámbitos territoriales de los Organismos de Cuenca y de los Planes Hidrológicos.**
- **Orden de 16 de diciembre de 1988 (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo), relativa a los métodos y frecuencias de análisis o de inspección de las aguas continentales que requieran protección o mejora para el desarrollo de la vida piscícola (BOE núm. 306, de 22 de diciembre de 1988).**
- **Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas. (BOE núm. 209, de 31 de agosto de 1988).**
- **Orden de 24 de septiembre de 1992, por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias, de acuerdo con lo establecido en el art. 88 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio (BOE núm. 249, de 16 de octubre de 1992).**
- **Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, sobre medidas de regularización y control de vertidos. (BOE núm. 95, de 21 de abril de 1995; rectific. BOE núm. 114, de 13 de mayo de 1995).**
- **Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias (BOE núm. 61, de 11 de marzo de 1996).**
- **Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.**

- **Real Decreto-Ley 9/1998, de 28 de agosto, por el que se aprueban y declaran de interés general determinadas obras hidráulicas. (BOE núm. 207, de 29 de agosto de 1998).**
- **Ley 46/1999, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE núm. 298, de 14 de diciembre de 1999).**
- **Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE núm. 147, de 20 de junio de 2000).**
- **Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DOCE núm. L 327, de 22 de diciembre de 2000).**
- **Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE núm. 176, de 24 de julio de 2001; corrección de errores BOE núm. 287, de 30 de noviembre de 2001).**
- **Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. (BOE núm. 161, de 6 de julio de 2001; Corrección de errores BOE núm. 184, de 5 de julio de 2001).**
- **Decisión n.º 2455/2001/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de noviembre de 2001, por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE. DOCE 15 Diciembre de 2001.**
- **Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (B.O.E. núm. 101, de 27 de abril de 2002).**
- **Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE núm. 45, de 21 de febrero de 2003).**
- **Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.**

MEDIO AMBIENTE

- **Directiva del Consejo 85/337/CEE, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (DOCE núm. L 175, de 5 de julio de 1985).**

- **Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE núm. 155, de 30 de junio de 1986).**
- **Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación del Impacto Ambiental. (BOE núm. 239, de 5 de octubre de 1988).**
- **Ley 4/1989, de 27 de marzo, de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres. (BOE núm. 74, de 28 de marzo de 1989).**
- **Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (DOCE núm. L 257, de 10 de octubre de 1996).**
- **Directiva 97/11/CE que modifica la Directiva 85/337/CEE.**
- **Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. BOE nº 96 de 22-4-1998.**
- **Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (BOE núm. 241, de 7 de octubre de 2000).**
- **Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE nº 111, de 9 de mayo de 2001).**
- **Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (BOE núm. 157, de 2 de julio de 2002).**

LEGISLACIÓN AUTONÓMICA DE CASTILLA-LEÓN.

- **Ley 8/1994, de 24 de junio (Castilla y León), de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales (BOE núm. 174, de 22 de julio de 1994; c.e. BOE núm. 203, de 25 de agosto de 1994).**
- **Decreto 194/1994 (Castilla y León), de 25 de agosto, por el que se aprueba el Catálogo de Zonas Húmedas y se establece su régimen de protección (Boletín Oficial de Castilla y León, número 168, de 31 de agosto de 1994)**
- **Decreto 209/1995 (Castilla y León), de 5 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental de Castilla y León (BO Castilla y León núm. 196, de 11 de octubre de 1995)**
- **Decreto 109/1998 (Castilla y León), de 11 de junio, por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero y se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias**

(BO Castilla y León, núm. 112, de 16 de junio de 1998; c.e. BO Castilla y León, número 119, de 25 de junio de 1998).

- **Ley 5/1998 (Castilla y León), de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 8/1994, de 24 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales de Castilla y León (BOE núm. 197, de 18 de agosto de 1998).**
- **Ley 10/1998 (Castilla y León), de 5 de diciembre, de Ordenación del Territorio de la Comunidad de Castilla y León (BO Castilla y León, número 236, de 10 de diciembre de 1998; corrección de errores BO Castilla y León núm. 223, de 18 de noviembre de 1999).**
- **Decreto 55/2002, de 11 de abril, por el que se aprueba el Plan Forestal de Castilla y León. B.O.C. y L. n.º 73. Miércoles, 17 de abril de 2002.**

RESOLUCIONES ADMINISTRATIVAS

- **Resolución de la Secretaría General de Agricultura y Alimentación fijando fecha para el levantamiento de actas previas a la ocupación en el expediente de expropiación forzosa del proyecto de recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia). BOE nº 125 de 25 de mayo de 2000, pg 7051.**
- **Resolución de la Secretaría General de Agricultura y Alimentación sobre información pública del proyecto de "Recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)". BOE nº 48 de 25 de febrero de 2000, pg 2458 (Información pública).**
- **Boletín oficial de las cortes generales. Senado. VI legislatura. Serie i: Boletín general 25 de febrero de 1999 núm. 639.**
- **Boletín oficial de las cortes generales. Senado. VII legislatura. Serie i: Boletín general 10 de noviembre de 2000 núm. 90.**

LEGISLACIÓN ESPECÍFICA EN MATERIA DE AGUAS

- **Directiva del Consejo 80/68/CEE, de 17 de diciembre de 1979, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas (DOCE núm. L 20, de 26 de enero de 1980).**

El Artículo 2 de la presente directiva menciona específicamente la recarga artificial del siguiente modo:

Las recargas artificiales de las aguas subterráneas para la gestión pública de las mismas, estarán sometidas a una autorización particular, que los Estados miembros concederán caso por caso. Dicha autorización sólo se concederá si no hubiere riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Las autoridades competentes controlarán el cumplimiento de las condiciones impuestas por las autorizaciones, así como la incidencia de los vertidos en las aguas subterráneas.

Los Artículos 6 y 13 aluden a los vertidos en cuanto a condiciones y cumplimiento de éstas.

- **Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. (BOE núm. 189, de 8 de agosto de 1985; corrección de errores BOE núm. 243, de 10 de octubre de 1985)**

TÍTULO III: De la planificación hidrológica.

Artículo 40: “Los Planes Hidrológicos de cuenca comprenderán obligatoriamente”.

- “Las directrices para recarga y protección de acuíferos”.

TÍTULO VIII: De las obras hidráulicas.

Artículo 114: “A los efectos de esta Ley, se entiende por obra hidráulica la construcción de bienes que tengan naturaleza inmueble destinada a la captación, extracción, desalación, almacenamiento, regulación, conducción, control y aprovechamiento de las aguas, así como el saneamiento, depuración, tratamiento y reutilización de las aprovechadas y las que tengan como objeto la recarga artificial de acuíferos, la actuación sobre cauces, corrección del régimen de corrientes y la protección frente a avenidas, tales como presas, embalses, canales de acequias, azudes, conducciones, y depósitos de abastecimiento a poblaciones, instalaciones de desalación, captación y bombeo, alcantarillado, colectores de aguas pluviales y residuales, instalaciones de saneamiento, depuración y tratamiento, estaciones de aforo, piezómetros, redes de control de calidad, diques y obras de encauzamiento y defensa contra avenidas, así como aquellas actuaciones necesarias para la protección del dominio público hidráulico “.

Según la Ley de Aguas española (Ley 29/85), establece en su art. 40, que los Planes de Cuenca deben ordenar los vertidos.

La misma ley en el capítulo II, art. 92 considera vertido a los que se realicen directa o indirectamente en los cauces, cualquiera que sea la naturaleza de éstos, así como los que

se lleven a cabo en el subsuelo o sobre el terreno, balsas o excavaciones, mediante evacuación, inyección o depósito.

La utilización de aguas superficiales para la recarga de acuíferos a la vista de esta Ley se considera como vertido y como tal es susceptible de provocar la contaminación o degradación del dominio público hidráulico, y por tanto requiere autorización administrativa (art. 92 de la L.A.)

La autorización administrativa del vertido se autoriza si el estudio hidrogeológico previo demostrase su inocuidad (art. 94 de la LA).

- **Reglamento del Dominio Público Hidráulico, RD 849/1986 de 11 de abril.**

De acuerdo con las indicaciones del artículo 245 del RD 849/1986 de 11 de abril y a las modificaciones del RD 1315/1992 las afecciones sobre materiales permeables conectados con acuíferos se entenderán como vertidos indirectos si se introduce alguna de las sustancias de la relación I y II.

El Artículo 237 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, en su apartado 3, establece que los estudios de evaluación de efectos medioambientales, en los casos de contaminación que pueda afectar a las aguas subterráneas, incluirán la evaluación de las condiciones hidrogeológicas de la zona afectada, del eventual poder depurador del suelo y del subsuelo, y de los riesgos de contaminación y de alteración de la calidad de las aguas subterráneas por el vertido.

En el artículo 254, apartado 4, el RLA determina que: *“Las autorizaciones de vertido limitarán rigurosamente las concentraciones de las sustancias figuradas en la relación I, a fin de eliminar del medio receptor sus efectos nocivos, según las normativas de vertido y calidad que sucesivamente se dicten. Respecto de las sustancias de la relación II, las autorizaciones, se sujetarán a las previsiones que para reducir la contaminación producida contengan los Planes Hidrológicos de cada cuenca”*. De este modo resulta patente la necesidad de establecer un estándar de calidad para las aguas de recarga.

- **Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.**

Disposición de entrada en vigor oficial de unos planes elaborados con anterioridad y, en la mayoría de los casos, operativos en la fecha.

- **Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas. (BOE núm. 209, de 31 de agosto de 1988)**

Las confederaciones, como entes autónomos adscritos a efectos administrativos al Ministerio de Medio Ambiente, reciben por parte de la legislación nacional una autonomía amplia para abordar las distintas problemáticas que prevalecen en cada cuenca.

En este contexto, la legislación nacional marca unos contenidos mínimos, como ocurre en el RAPAPH, TÍTULO II: De la planificación hidrológica:

“CAPITULO II: Objetivos generales y ámbito territorial de los planes.

SECCION 1ª: Contenido de los Planes Hidrológicos de cuenca.

Artículo 72: “Los Planes Hidrológicos de cuenca comprenderán, obligatoriamente:

- *Las directrices para **recarga** y protección **de acuíferos**”. (.../...)*

Artículo 73: 2) “Los recursos naturales se evaluarán con independencia de los sistemas de explotación. Su inventario contendrá, en la medida que sea posible:

*b) Interrelaciones de las magnitudes consideradas, especialmente entre las aguas, superficiales y subterráneas y entre las precipitaciones y las aportaciones de los ríos, o **recarga de acuíferos**”.*

*Artículo 84: 1) “El Plan Hidrológico podrá incluir las áreas de posible **recarga artificial** de acuíferos, para las que se detallarán el objetivo de la recarga, así como la procedencia, cuantía y calidad de los recursos aplicados. Las sucesivas áreas de recarga que vayan determinándose se incorporarán al Plan a medida que se definan”.*

- **Orden de 24 de septiembre de 1992, por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias, de acuerdo con lo establecido en el art. 88 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio (BOE núm. 249, de 16 de octubre de 1992).**

La orden contempla la recarga artificial de forma colateral como técnica para paliar los déficit hídricos.

ANEXO

Capítulo IV: Asignación y reserva de recursos.

Artículo. 23. Definición de déficit y excedente. Se entenderán que en un sistema de explotación de recursos se produce un «excedente» en un horizonte temporal y lugar determinado cuando, de acuerdo con las normas de utilización y reglas de explotación del sistema y atendidas las demandas y garantías establecidas, se genere un superávit del recurso.

*Se entenderá que en un sistema de explotación de recursos se produce un «déficit» en un horizonte temporal y lugar determinado cuando, agotadas todas las posibilidades hídricas del sistema, no es posible atender la demanda, incluidas las actuaciones dirigidas al ahorro de agua, la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, la **recarga artificial**, la sobreexplotación temporal de acuíferos y otras medidas técnicas.*

Las simulaciones efectuadas para establecer la situación de excedente o déficit deberán realizarse utilizando los criterios de garantía y demandas evaluadas según los criterios y dotaciones que se incluyen en estas instrucciones y recomendaciones.

- **Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, sobre medidas de regularización y control de vertidos. (BOE núm. 95, de 21 de abril de 1995; rectif. BOE núm. 114, de 13 de mayo de 1995).**

Este Real Decreto no contempla de forma específica la recarga artificial de acuíferos, no existiendo ninguna cita en su contenido, si bien, dispone en su preámbulo y en su artículo 1 una serie de objetivos, de carácter procedimental para las actuaciones relacionadas con vertidos y la consecución de *"planes sectoriales de regularización"*:

PREÁMBULO

.../... "En consecuencia, el presente Real Decreto pretende fundamentalmente dos objetivos. En primer lugar, alcanzar el ordenamiento definitivo de los vertidos existentes a través de "planes concretos de regularización" llamados a conseguir, mediante una serie de actuaciones programadas en el tiempo, el adecuado tratamiento de todo vertido. Las correspondientes autorizaciones definitivas tendrán, lógicamente, carácter temporal y renovable, previas las comprobaciones necesarias que aseguren en todo caso el cumplimiento por sus titulares de las obligaciones que les imponen. En coherencia con las medidas de regularización que se establecen, la inviabilidad de un vertido, ya sea debida a las características del mismo, a su defectuoso tratamiento o al incumplimiento de las previsiones correctoras, motivará su suspensión o clausura sin perjuicio de la adopción de las demás medidas contenidas en la norma.

El segundo objetivo, en aplicación del principio de fomento de toda actuación orientada a la recuperación y mantenimiento del orden público administrativo en materia de policía de aguas, consiste en el establecimiento de un sistema de ayudas económico-financieras para el cumplimiento de los "planes de regularización" de los vertidos, tanto urbanos como industriales. Dicho sistema prevé la posible aplicación de dichas ayudas en el marco de "planes sectoriales de regularización", de ámbito nacional o superior a la cuenca hidrográfica, que comprometerían y beneficiarían a la vez a determinados grupos de industrias de problemática homogénea. Estos planes habrán de permitir la reducción de determinados costes y la mejor coordinación y, consecuentemente, lógica conducción del proceso de ordenación que se pretende.

Por último, la nueva figura de la "empresa colaboradora" que se crea, especializada en materia de proyectos de tratamiento de vertidos e implantación de instalaciones y medidas correctoras de los mismos, está llamada a facilitar a los usuarios la disponibilidad de un repertorio de medios técnicos imprescindible para el éxito de dicho proceso.

Artículo 1. Objeto de la norma.- Es objeto del presente Real Decreto la regulación del procedimiento y el establecimiento de medidas complementarias para la adaptación de los vertidos, que se producen en el ámbito territorial de las cuencas hidrográficas de competencia del Estado, a las previsiones en la materia de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas".

- **Real Decreto 484/1995, de 7 de abril, sobre medidas de regularización y control de vertidos. (BOE núm. 95, de 21 de abril de 1995; rectif. BOE núm. 114, de 13 de mayo de 1995).**

Reglamentación procedimental se escaso interés desde el punto de vista conservacionista.

- **Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (P.H.D.). Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los Ámbitos territoriales de los Organismos de Cuenca y de los Planes Hidrológicos, Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca, y Orden de 13 de agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de Cuenca del Duero, aprobado por el Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio**

El P.H.D., junto con el Plan de Cuenca del Ebro, son los que más abordan objetivos de recarga artificial dentro del territorio nacional. En el documento “*Seguimiento y revisión del Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero, TOMO IV, informe de seguimiento y revisión del Plan*”, se abordan los siguientes aspectos relativos a recarga artificial (A.R.):

En cuanto al estado de los acuíferos (punto 3.1.5.4), cita que para avanzar en el conocimiento de los acuíferos de la cuenca del Duero y mejorar sus criterios de explotación se ha trabajado en tres líneas. Entre ellas cabe destacar la última: “*Identificación de acciones y programación de actividades de **recarga artificial** de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*”, actividad realizada en el año 2000 por los mismos Organismos.

En el subapartado C se mencionan los “*Estudios de uso conjunto de los recursos superficiales y subterráneos*”.

En el estudio del estado de los acuíferos de ámbito local, se citan los que se están desarrollando en el ámbito de las cuencas del Cega-Pirón y Adaja-Eresma; cuencas que comprenden las unidades hidrogeológicas de Los Arenales (2.17) y Segovia (2.18).

Directrices para la recarga y protección de acuíferos (punto 3.2.8.).

En 2001 se ha finalizado un estudio, realizado por la Confederación Hidrográfica del Duero, mediante el cual se han aprobado unas normas de otorgamiento de concesiones en las unidades hidrogeológicas del Páramo de Cuéllar (UH 02.13) y Región de los Arenales (UH 02.17). Estas normas fueron aprobadas, a propuesta de la Comisaría de Aguas, por la Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Duero en septiembre de 2001. Mediante estas normas pretenden mejorar problemas que afectan a dichas unidades, contemplando la construcción de infraestructuras básicas.

3.2.9 Infraestructuras básicas requeridas por el plan.

Incluye las “instalaciones para la **recarga artificial**” (3.2.9.6), mencionando las del Carracillo y la de los Arenales.

En este mismo tomo se fijan una serie de directrices, entre las que cabe destacar las directrices I y J.:

La primera es relativa a la recarga y protección de acuíferos, e informa de las inversiones pendientes en septiembre de 2001, que se dirigen a tres actividades:

- Estudio de unidades hidrogeológicas que precisan medidas de protección.
- Estudio de declaración de acuíferos sobreexplotados.
- Áreas de posible **recarga artificial**.

Para ello establece un presupuesto de 520 millones de pesetas, 380 para la primera, 140 para la segunda y la tercera queda en blanco.

La Directriz J se llama: “*Infraestructuras básicas requeridas por el Plan de inversiones pendiente en septiembre de 2001*”. En ella aparece desglosada una partida para “Instalaciones para la **recarga artificial**”, con un presupuesto de 3.463 millones de pesetas.

En el Anejo 2 es descrita la actualización de los datos del Plan, mencionando varias actuaciones de AR, hasta el punto de ser la cuenca que prevé mayor cantidad de actuaciones de AR: Zona de la Moraña (Ávila), Alto Carrión y Ucieza-Valdecuriada (Palencia), zona Este de Salamanca, río Guareña y margen derecha del Tera en Zamora, y recarga del Carracillo y de Santiuste en Segovia.

El apartado 4.4.: *Estado de los acuíferos*, relata como recientemente se ha finalizado el trabajo “*Normas de otorgamiento de concesiones en las UUHH Páramo de Cuéllar y Región de los Arenales*”. Este ha sido realizado por la DGOHCA junto con la Confederación Hidrográfica del Duero, y en él se adoptan medidas de protección en estas dos unidades hidrogeológicas.

Además de este trabajo, se han desarrollado otros que permiten avanzar en el conocimiento y gestión de las aguas subterráneas, como es el estudio de “*Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*, desarrollado en el año 2000”. En este se definen las características de las actuaciones de recarga que deberían llevarse a cabo en diferentes acuíferos en el ámbito nacional.

En lo que atañe a la cuenca del Duero se han propuesto actuaciones de recarga en cinco acuíferos distribuidos en tres unidades hidrogeológicas: Calizas de montaña de Camporredondo (UH 2.01 - La Robla-Guardo), detrítico terciario del Esgueva (UH 2.08 - Central del Duero), comarca del Carracillo, Cubeta de Santiuste y La Moraña (UH 2.17 - Región de los Arenales).

Anexo nº 4 - Revisión del Plan Hidrológico. En este se incluyen las directrices para la recarga y protección de acuíferos, denominando los agentes encargados y el presupuesto disponible. Cabe destacar la última fase, dirigida a la detección de áreas propicias para la **recarga artificial**.

En el anexo nº 9 se presenta un listado de ampliación del catálogo de zonas húmedas de la comunidad de Castilla y León. En él no hay ningún humedal de los estudiados en este proyecto de investigación asociado a operaciones de recarga artificial, si bien, cabe puntualizar que en las inmediaciones de las zonas de recarga hay varios humedales susceptibles de regeneración hídrica, como son las lagunas Sg-26 y 27 de Cantalejo (Segovia).

- **Real Decreto-Ley 9/1998, de 28 de agosto, por el que se aprueban y declaran de interés general determinadas obras hidráulicas. (BOE núm. 207, de 29 de agosto de 1998).**

Las operaciones de recarga artificial realizadas en el acuífero de los Arenales reciben la catalogación de “*interés general*”, contando de este modo con cierta prioridad con respecto a otras actuaciones.

Artículo 2: "Se declaran igualmente de interés general, las siguientes obras hidráulicas relacionadas de modo directo con aprovechamiento de riego .../....

.../... régimen de financiación, será de aplicación la clasificación que de las mismas haya establecido cada Comunidad Autónoma, de acuerdo con el Decreto 118/1973, de 12 de enero, por el que se aprueba el texto de la Ley de Reforma y Desarrollo Agrario. (...).

Las finalidades y características de las obras quedan recogidas en el anexo II de este Real Decreto-ley:

ANEXO II. (...) 3. “Recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista. Obras de toma, conducción principal, infiltración y adcuación de las zonas regables (Segovia).

Para la recarga de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia) se pretende un trasvase desde el río Voltoya hasta la citada cubeta. Las obras a realizar consisten en un azud de derivación en el citado río y una tubería de 9.823 metros de longitud y 1.100 milímetros de diámetro, derivándose un caudal de 1 metro cúbico por segundo. El período de recarga considerado es desde el 1 de noviembre al 1 de mayo”.

- **Orden de 16 de diciembre de 1988 (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo), relativa a los métodos y frecuencias de análisis o de inspección de las aguas continentales que requieran protección o mejora para el desarrollo de la vida piscícola (BOE núm. 306, de 22 de diciembre de 1988).**

En esta orden se fijan ciertos objetivos de calidad de los cauces superficiales:

Artículo 1.- Es objeto de la presente Orden la determinación de los métodos de análisis o de inspección que deben emplear los Organismos de cuenca en el control de la calidad de las aguas que requieran protección o mejora para el desarrollo de la vida piscícola, así como de las frecuencias mínimas del muestreo y medición, para cada uno de los parámetros que figuran en el anexo III del Reglamento de la Administración Pública del

Agua y de la planificación Hidrológica, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio.

Artículo 2. Las aguas se consideran aptas para esta finalidad, cuando los análisis de sus muestras, tomadas en un mismo lugar, a lo largo de un período de doce meses y según la frecuencia mínima que figura en el anexo de la presente Orden, cumplan con los límites y requisitos que se establecen en el anexo 3 del Reglamento, citado en el apartado primero anterior, en lo que se refiere a los siguientes extremos:

- El 95% de los resultados de los parámetros siguientes: pH, DBO5, amoníaco no ionizado, amonio total, nitritos, cloro residual total, zinc total y cobre soluble. Si la frecuencia de muestreo fuera inferior a un mes, los límites antes mencionados deberán respetarse para todas las muestras.*
- Los porcentajes previstos en temperatura y oxígeno disuelto.*
- La concentración media de las materias en suspensión.*

El incumplimiento de aquellos límites y requisitos no será tomado en consideración en el cálculo de los porcentajes anteriores cuando ello fuera consecuencia de inundaciones o de otras catástrofes naturales.

Los principales parámetros quedan recogidos en la tabla adjunta:

Parámetro	Método de análisis o de inspección	Frecuencia mínima de muestreo y medición
1. Temperatura (°C)	Termometría	Semanal, aguas abajo y aguas arriba del vertido térmico, si lo hubiera
2. Oxígeno disuelto (mg/O ₂)	Método de Winkler o electrodo específico	Mensual, con al menos una muestra representativa de bajo contenido en oxígeno del día de la toma de la muestra. Sin embargo, de suponer variaciones diurnas significativas, se realizarán, al menos, dos tomas de muestras diarias.
3 pH	Electrometría previa calibración	Mensual
4. Materias en suspensión (mg/l.)	Filtración a 0,45 m. Secado a 105° C	—
5. DBO ₅ (mg/l. de O ₂)	Método de Winkler con incubación a 20° C	—
6. Fósforo total (mg/l. de P)	Espectrofotometría de absorción molecular	—
7. Nitritos (mg/l. de NO ₂)	Espectrofotometría de absorción molecular	—
8. Compuestos fenólicos (mg/l. C ₆ H ₅ OH)	Examen gustativo	—
9. Hidrocarburos de origen petrolero	Examen visual y gustativo	Mensual
10. Amoníaco no ionizado (mg/l NH ₃)	Espectrofotometría o método de Nessler	Mensual
11. Amonio total (mg/l. NH ₄)	Espectrofotometría o método de Nessler	Mensual
12. Cloro residual total (mg/l. HOCl)	Método DPD	Mensual
13. Zinc (mg/l Zn)	Espectrometría atómica	Mensual
14. Cobre (mg/Cu)	Espectrometría atómica	Mensual

- Ley 46/1999, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE núm. 298, de 14 de diciembre de 1999).

Esta nueva Ley lleva consigo importantes modificaciones respecto a la previa, algunas relativas a las actuaciones de recarga artificial y vertidos. Las actuaciones de recarga artificial ya son consideradas obras hidráulicas:

«Artículo 13 bis. “Todas las personas físicas o jurídicas tienen derecho a acceder a la información en materia de aguas en los términos previstos en la Ley 38/1995, de 12 de diciembre, sobre el derecho a la información en materia de medio ambiente, y, en particular, a la información sobre vertidos.

Decimoctavo. Se modifica la redacción del apartado 1 del artículo 53 y se añade un apartado 4, con los siguientes contenidos:

«4. Los Organismos de cuenca determinarán, en su ámbito territorial, los sistemas de control efectivo de los caudales de agua utilizados y de los vertidos al dominio público hidráulico que deban establecerse para garantizar el respeto a los derechos existentes, permitir la correcta planificación y administración de los recursos, y, asegurar la calidad de las aguas.

La obligación de instalar y mantener sistemas de medición es exigible también a quienes realicen cualquier tipo de vertidos en el dominio público hidráulico”.

*Artículo 114: “A los efectos de esta Ley, se entiende por obra hidráulica la construcción de bienes que tengan naturaleza inmueble destinada a la captación, extracción, desalación, almacenamiento, regulación, conducción, control y aprovechamiento de las aguas, así como el saneamiento, depuración, tratamiento y reutilización de las aprovechadas y las que tengan como objeto la **recarga artificial** de acuíferos, la actuación sobre cauces, corrección del régimen de corrientes y la protección frente a avenidas, tales como presas, embalses, canales de acequias, azudes, conducciones, y depósitos de abastecimiento a poblaciones, instalaciones de desalación, captación y bombeo, alcantarillado, colectores de aguas pluviales y residuales, instalaciones de saneamiento, depuración y tratamiento, estaciones de aforo, piezómetros, redes de control de calidad, diques y obras de encauzamiento y defensa contra avenidas, así como aquellas actuaciones necesarias para la protección del dominio público hidráulico”.*

- **Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE núm. 147, de 20 de junio de 2000).**

El R.D. regula específicamente los vertidos en el medio acuático y las autorizaciones, si bien no contempla supuestos de recarga artificial. Considerando la recarga un vertido, cabe mencionar el artículo 4:

Artículo 4. Autorizaciones de vertido.

1. Las autorizaciones de vertido que contengan sustancias preferentes fijarán para cada una de ellas valores límite de emisión, que se determinarán tomando en consideración los objetivos de calidad establecidos.

2. Cuando se otorgue una nueva autorización o se modifiquen las condiciones de las ya existentes, se establecerá, en su caso, un programa de reducción de la contaminación, que incluirá las actuaciones previstas y los plazos en que éstas deberán ejecutarse, para conseguir la progresiva adecuación de las características de los vertidos a los límites que en las autorizaciones o en sus modificaciones se fijen, con la finalidad de alcanzar los

objetivos de calidad establecidos. En la elaboración del citado programa se tomarán en consideración las singularidades hidrológicas que pudiesen existir.

En cuanto a su relación con el medio ambiente, el R.D. adquiere una nueva dimensión, el estado ecológico de las aguas, punto de transición hacia el “buen estado de las aguas” que definirá la Directiva 2000/60/CE o Directiva Marco.

El nuevo artículo 92 de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, conforme a la redacción dada por la Ley 46/1999, de 13 de diciembre, precisa, en su apartado 2, que las autorizaciones de vertido tendrán como objetivo conseguir *un buen estado ecológico* de las aguas, de acuerdo con las normas de calidad, los objetivos ambientales y las características de emisión e inmisión establecidas reglamentariamente. Establece además, en su apartado 3, que, cuando se otorgue una autorización o se modifiquen sus condiciones, podrán establecerse plazos y programas de reducción de la contaminación para la progresiva adecuación de las características de los vertidos a los límites que en ella se fijen.

Dentro de su articulado aparecen nuevas ideas y conceptos de alta carga medioambiental. Por ejemplo, articula en su artículo 5 un carácter excepcional a las aguas de **recarga artificial**, consideradas un vertido:

La calidad de las aguas de recarga ni es mencionada de forma específica, pero resulta aplicable el artículo 5:

Artículo 5. Régimen de excepciones. Las autorizaciones de vertido no tomarán en consideración los objetivos de calidad establecidos en el anejo I de este Real Decreto en los siguientes supuestos:

- a) En relación con aquella o aquellas sustancias preferentes para las que un determinado plan hidrológico de cuenca haya fijado objetivos de calidad, por usos, más exigentes que los establecidos en este Real Decreto.*
- b) Cuando se constate que existe un enriquecimiento natural de las aguas por dichas sustancias que imposibilite el cumplimiento de los objetivos de calidad.*

- **Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (DOCE núm. L 327, de 22 de diciembre de 2000).**¹

Importante Directiva donde quedan recogidos los objetivos de calidad de las aguas que deben cumplir los estados miembros antes del año 2015. Este objetivo es denominado el G.S (Good Status), o “Buen Estado de las Aguas”, designado afectuosamente B.E.D.L.A. Contiene además definiciones oficiales para términos no demasiado claros:

Artículo 2: "Definiciones. A efectos de la presente Directiva se entenderá por:

¹ En el momento de redacción de este apartado la DM se encuentra a 1 mes del plazo de trasposición legal, y no se ha difundido la existencia de ningún borrador en los foros del agua.

27) «recursos disponibles de aguas subterráneas»: el valor medio interanual de la tasa de recarga total de la masa de agua subterránea, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada según las especificaciones del artículo 4, para evitar cualquier disminución significativa en el **estado ecológico de tales aguas**, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados."

Artículo 11: "Programa de medidas. (...)

3. Las «medidas básicas» son los requisitos mínimos que deberán cumplirse y consistirán en: (...)

f) medidas de control, con inclusión de un requisito de autorización previa, de la recarga artificial o el aumento de masas de agua subterránea. El agua que se utilice podrá obtenerse de cualquier agua superficial o subterránea, siempre que el uso de la fuente no comprometa la consecución de los objetivos medioambientales establecidos para la fuente o la masa de agua recargada o aumentada. Dichos controles se revisarán periódicamente y, cuando proceda, se actualizarán."

ANEXO II. 2. Aguas subterráneas.

2.1. Caracterización inicial.

Los Estados miembros llevarán a cabo una caracterización inicial de todas las masas de agua subterránea para poder evaluar su utilización y la medida en que dichas aguas podrían dejar de ajustarse a los objetivos para cada masa de agua subterránea a que se refiere el artículo 4. Los Estados miembros podrán agrupar distintas masas de agua subterránea a efectos de dicha caracterización inicial. En el análisis podrán utilizarse los datos existentes en materia de hidrología, geología, edafología, uso del suelo, vertidos y extracción, así como otro tipo de datos, y se indicarán:

- la ubicación y los límites de la masa o masas de agua subterránea;
- las presiones a que están expuestas la masa o masas de agua subterránea, entre las que se cuentan:
 - fuentes de contaminación difusas,
 - fuentes de contaminación puntuales,
 - extracción de agua,
 - **recarga artificial de agua,**
- las características generales de los estratos suprayacentes en la zona de captación a partir de la cual recibe su alimentación la masa de agua subterránea;
- las masas de agua subterránea de las que dependan directamente ecosistemas de aguas superficiales o ecosistemas terrestres.

2.2. Caracterización adicional.

Una vez realizado dicho análisis inicial de las características, los Estados miembros realizarán una caracterización adicional de las masas o grupos de masas de agua subterránea que presenten un riesgo con el objeto de evaluar con mayor exactitud la importancia de dicho riesgo y de determinar con mayor precisión las medidas que se deban adoptar de conformidad con el artículo 11. En consecuencia, esta caracterización deberá incluir información pertinente sobre la incidencia de la actividad humana (véase el anexo III) y, si procede, información sobre:

- las características geológicas del acuífero, incluidas la extensión y tipo de unidades geológicas,
- las características hidrogeológicas de la masa de agua subterránea, incluidos la permeabilidad, la porosidad y el confinamiento,
- las características de los depósitos superficiales y tierras en la zona de captación a partir de la cual la masa de agua subterránea recibe su alimentación, incluidos el grosor, la porosidad, la permeabilidad y las propiedades absorbentes de los depósitos y suelos,
- las características de estratificación de agua subterránea dentro del acuífero,
- un inventario de los sistemas de superficie asociados, incluidos los ecosistemas terrestres y las masas de agua superficial, con los que esté conectada dinámicamente la masa de agua subterránea,
- los cálculos sobre direcciones y tasas de intercambio de flujos entre la masa de agua subterránea y los sistemas de superficie asociados,
- datos suficientes para calcular la tasa media anual de recarga global a largo plazo,
- las características de la composición química de las aguas subterráneas, especificando las aportaciones de la actividad humana. Los Estados miembros podrán utilizar tipologías para la caracterización de las aguas subterráneas al determinar los niveles naturales de referencia de dichas masas de agua subterránea.

2.3. Examen de la incidencia de la actividad humana en las aguas subterráneas.

Por lo que se refiere a las masas de agua subterránea que cruzan la frontera entre dos o más Estados miembros o que se considere, una vez realizada la caracterización inicial con arreglo al punto 2.1, que pueden no ajustarse a los objetivos establecidos para cada masa de agua a que se refiere el artículo 4, deberán recogerse y conservarse, si procede, los datos siguientes relativos a cada masa de agua subterránea:(...)

d) la ubicación de los puntos de la masa de agua subterránea en los que tiene lugar directamente una **recarga artificial**;

e) las tasas de recarga en dichos puntos;

f) la composición química de las aguas introducidas en la recarga del acuífero;

g) el uso del suelo en la zona o zonas de recarga natural a partir de las cuales la masa de agua subterránea recibe su alimentación, incluidas las entradas contaminantes y las alteraciones antropogénicas de las características de la recarga natural, como por ejemplo la desviación de las aguas pluviales y de la escorrentía mediante la impermeabilización del suelo, la alimentación artificial, el embalsado o el drenaje."

Se trata de un hito en la historia de la Comunidad Europea, al poner un plazo para conseguir un estado cualitativo en aguas continentales y litorales. Define además con estándares de calidad el "estado ecológico de las aguas", el "buen estado de las aguas" y otros términos que quedan acuñados e integrados en la literatura hidrogeológica. Considera además el empleo de nuevas técnicas y herramientas, como puede ser la modelación como medio para conseguir los objetivos propuestos.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE núm. 176, de 24 de julio de 2001; corrección de errores BOE núm. 287, de 30 de noviembre de 2001).

Nueva modificación de la Ley de Aguas en el proceso de adaptación a las disposiciones marcadas por la CEE. Abunda sobre la definición de obra hidráulica, ya anticipada en la Ley anterior, especificando la pertenencia de la recarga artificial a esta categoría e indicando la obligatoriedad de marcar las directrices desde su previsión:

TITULO III DE LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA.

Artículo 42: “Contenido de los planes hidrológicos de cuenca.

Los planes hidrológicos de cuenca comprenderán obligatoriamente:

*i) Las directrices para **recarga y protección de acuíferos**”.*

TITULO VIII DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS

CAPITULO I CONCEPTO Y NATURALEZA JURÍDICA DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS.

Artículo 122. Concepto de “obra hidráulica”.

*A los efectos de esta Ley, se entiende por obra hidráulica la construcción de bienes que tengan naturaleza inmueble destinada a la captación, extracción, desalación, almacenamiento, regulación, conducción, control y aprovechamiento de las aguas, así como el saneamiento, depuración, tratamiento y reutilización de las aprovechadas y las que tengan como objeto la **recarga artificial de acuíferos**, la actuación sobre cauces, corrección del régimen de corrientes y la protección frente avenidas, tales como presas, embalses, canales de acequias, azudes, conducciones, y depósitos de abastecimiento a poblaciones, instalaciones de desalación, captación y bombeo, alcantarillado, colectores de aguas pluviales y residuales, instalaciones de saneamiento, depuración y tratamiento, estaciones de aforo, piezómetros, redes de control de calidad, diques y obras de encauzamiento y defensa contra avenidas, así como aquellas actuaciones necesarias para la protección del dominio público hidráulico”.*

- **Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. (BOE núm. 161, de 6 de julio de 2001; Corrección de errores BOE núm. 184, de 5 de julio de 2001).**

En el PHN no se plantea la recarga artificial como una alternativa complementaria a los fines previstos, como ejemplo más dentro del carácter rígido de la ley. Exclusivamente en su apartado 3: “Análisis hidrológicos”, menciona la recarga artificial en el delta del Llobregat.

En cuanto a aspectos medioambientales, hay un tomo completo abordando la situación. En lo relativo a humedales, la Ley, recogiendo la filosofía del Libro Blanco del Agua 2000, pone especial énfasis en garantizar un uso racional y sostenible de los recursos hidráulicos, preocupación que se trasluce a lo largo de todo su articulado. Entre éstos por su singularidad merecen especial mención la gestión eficaz de las aguas para abastecimiento, la exigencia de máxima eficiencia en la gestión del recurso en las cuencas receptoras, la regulación de las reservas hidrológicas por motivos ambientales, la gestión de las sequías y regulación de zonas inundables, protección de las aguas subterráneas y conservación de humedales y actuaciones de sensibilización, formación y educación en el uso sostenible del agua.

El Artículo 31 regula parcialmente la gestión de los humedales:

1. El Ministerio de Medio Ambiente, en coordinación con las Comunidades Autónomas, establecerá un sistema de investigación y control para determinar los requerimientos hídricos necesarios que garanticen la conservación de los humedales existentes que estén inventariados en las cuencas intercomunitarias.

2. Asimismo, el Ministerio de Medio Ambiente y las Comunidades Autónomas promoverán la recuperación de humedales, regenerando sus ecosistemas y asegurando su pervivencia futura.

TITULO II: Normas complementarias a la planificación

Artículo 36: “Programación de inversiones.

*2. En la elaboración de la programación de inversiones públicas en obras hidráulicas se deberá establecer un equilibrio adecuado entre las inversiones destinadas a la realización de nuevas infraestructuras y las que se destinen a asegurar el adecuado mantenimiento de las obras hidráulicas existentes y a minimizar sus impactos en el entorno en el que se ubican. En este sentido, en los nuevos encauzamientos se tenderá, siempre que sea posible, a incrementar sustancialmente la anchura del cauce de máxima avenida, revegetando estas áreas con arbolado de ribera autóctono. Asimismo, se respetarán en todo momento las condiciones naturales de las riberas y márgenes de los ríos, conservando su valor ecológico, social y paisajístico, y propiciando **la recarga de los álveos y otros acuíferos relacionados con los mismos**”.*

Dentro de los comentarios suscitados por la Ley, y como ejemplo de los muchos trabajos realizados, existen tratamientos específicos a la recarga artificial, en los que los autores denuncian la falta de propuestas de medidas para recuperar y realimentación los sistemas sobreexplotados, empleando para ello la recarga artificial directa (superficial o subterránea), o inducida (obras hidráulicas específicas). Las denuncias ante la falta de confianza en esta tecnología, muy probablemente por desconocimiento de sus potencialidades, son sobresalientes, (Fernández Rubio, 2001, Villarroya, 2002).

- **Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (B.O.E. núm. 101, de 27 de abril de 2002).**

En el análisis léxico-gráfico de esta disposición no se han detectado alusiones a recarga artificial, zonas húmedas o humedales, si bien contempla la salvedad de contribuir a la conservación de los espacios naturales protegidos y acuíferos adyacentes a las zonas regables.

Artículo 2. Objetivos generales: (...)

e) Incorporar criterios ambientales en la gestión de las zonas de regadíos a fin de evitar la degradación de las tierras, favorecer la recuperación de acuíferos y espacios naturales valiosos, proteger la biodiversidad y los paisajes rurales y reducir los procesos de desertización.

- **Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE núm. 45, de 21 de febrero de 2003).**

En el análisis léxico-gráfico de esta disposición no se han detectado alusiones a recarga artificial, si bien aparecen varias modificaciones en los estándares de calidad para aguas de consumo humano, aplicable también a la ganadería.

- **Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. BOE 6 Junio.**

El análisis léxico-gráfico de este RD concluye en que hay una única alusión a las operaciones de AR en todo su contenido:

SECCIÓN 4. VERTIDOS A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Artículo 257. Vertidos de sustancias peligrosas a las aguas subterráneas

*5. Quedan sometidas a autorización las **recargas artificiales de acuíferos**, que sólo podrán otorgarse cuando con ellas no se provoque la contaminación de las aguas subterráneas.*

LEGISLACIÓN ESPECÍFICA EN MATERIA MEDIOAMBIENTAL

- **Directiva del Consejo 85/337/CEE, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (DOCE núm. L 175, de 5 de julio de 1985).**

Se trata de una de las Directivas pioneras en materia de Medio Ambiente, que perfiló las pautas principales de su trasposición.

En los anejos 1 y 2 presenta un listado de actuaciones que recomiendan o requieren Estudio de Impacto Ambiental:

” Proyectos para la extracción de aguas subterráneas o la recarga artificial de acuíferos si el volumen anual de agua extraída o aportada es igual o superior a 10 millones de metros cúbicos”.

Anejo 2. (...) l) “Proyectos de extracción de aguas subterráneas y de recarga artificial de acuíferos no incluidos en el Anexo I”.

Esta fue ligeramente modificada en la directiva 97/11/CE.

- **Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE núm. 155, de 30 de junio de 1986).**

Trasposición de la Directiva anterior con muy ligeras modificaciones. Las actividades sometidas a impacto son mencionadas en los anexos 1 y 2:

12 (...) “Explotaciones que se realicen por debajo del nivel freático, tomando como nivel de referencia el más elevado entre las oscilaciones anuales, o que puedan suponer una disminución de la **recarga de acuíferos superficiales** o profundos.

Explotaciones de depósito ligados a la dinámica fluvial, fluvio-glacial, litoral o eólica, y depósitos marinos.”

- **Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación del Impacto Ambiental. (BOE núm. 239, de 5 de octubre de 1988).**

Reglamento que desarrolla el R.D. anterior. En sus anejos especifica ciertas disposiciones:

12 (...) “Explotaciones que se realicen por debajo del nivel freático, tomando como nivel de referencia el más elevado entre las oscilaciones anuales, o que puedan suponer una disminución de la recarga de acuíferos superficiales o profundos”.

- **Ley 4/1989, de 27 de marzo, de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres. (BOE núm. 74, de 28 de marzo de 1989).**

La ley hace mención a las zonas húmedas, estableciendo competencias para su conservación, restauración y catalogación.

Artículo 9. 3. La planificación hidrológica deberá prever en cada cuenca hidrográfica las necesidades y requisitos para la conservación y restauración de los espacios naturales en ella existentes, y en particular de las zonas húmedas

CAPITULO V: De los espacios naturales sometidos a régimen de protección preventiva:

Artículo 25. Por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación con la información suministrada por las Comunidades Autónomas en cuyo territorio se encuentren, se elaborará y se mantendrá permanentemente actualizado un Inventario Nacional de Zonas Húmedas, a fin de conocer su evolución y, en su caso, indicar las medidas de protección que deben recoger los planes hidrológicos de cuencas.

La Ley indica la necesidad y obligatoriedad de elaborar y mantener actualizado un inventario de zonas húmedas y conocer su evolución.

- **Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. BOE nº 96 de 22-4-1998.**

Esta Ley es aplicable a todo tipo de residuos, con excepción de las emisiones a la atmósfera, los residuos radiactivos y los vertidos a las aguas.

- **Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (BOE núm. 241, de 7 de octubre de 2000).**

De acuerdo con este R.D., la legislación medioambiental considera la obligatoriedad de estudiar efectos medioambientales adversos en las operaciones de recarga artificial:

"Artículo 1. 1. Los proyectos, públicos o privados, consistentes en la realización de las obras, instalaciones o de cualquier otra actividad comprendida en el anexo I del presente Real Decreto legislativo, deberán someterse a una evaluación de impacto ambiental en la forma prevista en esta disposición.

ANEXO I: Proyectos contemplados en el apartado 1 del artículo 1

Grupo 8. Proyectos de ingeniería hidráulica y de gestión del agua (...)

*b) Proyectos para la extracción de aguas subterráneas o la **recarga artificial de acuíferos**, si el volumen anual de agua extraída o aportada es igual o superior a 10 millones de metros cúbicos.*

c) Proyectos para el trasvase de recursos hídricos entre cuencas fluviales .../...

- **Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (BOE núm 111, de 9 de mayo de 2001).**

El R.D. previo tuvo escasa trascendencia, siendo refundido en la ley 6/2001 sin modificaciones sustanciales:

"Artículo 1. Los proyectos, públicos o privados, consistentes en la realización de las obras, instalaciones o de cualquier otra actividad comprendida en el anexo I del presente Real Decreto legislativo deberán someterse a una evaluación de impacto ambiental en la forma prevista en esta disposición.

ANEXO I: Proyectos contemplados en el apartado 1 del artículo 1:

Grupo 7. Proyectos de ingeniería hidráulica y de gestión del agua (...).

b) Proyectos para la extracción de aguas subterráneas o la recarga artificial de acuíferos, si el volumen anual de agua extraída o aportada es igual o superior a 10.000.000 de metros cúbicos.

Grupo 8. Proyectos de ingeniería hidráulica y de gestión del agua (...).

a) Extracción de aguas subterráneas o recarga de acuíferos cuando el volumen anual de agua extraída o aportada sea superior a 1.000.000 de metros cúbicos (proyectos no incluidos en el anexo I).

Grupo 9. Otros proyectos (...).

k) Cualquier cambio o ampliación de los proyectos que figuran en los anexos I y II, ya autorizados, ejecutados o en proceso de ejecución que puedan tener efectos adversos significativos sobre el medio ambiente (...).

- **Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (BOE núm. 157, de 2 de julio de 2002).**

Esta Ley supone la trasposición de la Directiva 96/61/CE, conocida como ICCP. Sin alusiones específicas a la recarga artificial, ya en su preámbulo manifiesta, como uno de sus objetivos, articular el procedimiento administrativo para cualquier vertido a las aguas.

El Título III es uno de los pilares esenciales sobre los que descansa la estructura de esta Ley, en la medida en que regula el régimen jurídico de la autorización ambiental integrada, la nueva figura autonómica de intervención ambiental que se crea para la protección del medio ambiente en su conjunto y que sustituye a las autorizaciones ambientales existentes hasta el momento, circunstancia que le atribuye un valor añadido, en beneficio de los particulares, por su condición de mecanismo de simplificación administrativa.

En este sentido, se articula un procedimiento administrativo complejo que integra todas las autorizaciones ambientales existentes relativas a producción y gestión de residuos, incluidas las de incineración, vertidos a las **aguas continentales** y desde tierra al mar, así como otras exigencias de carácter ambiental contenidas en la legislación sectorial.

LEGISLACIÓN AUTONÓMICA

- **Ley 8/1994, de 24 de junio (Castilla y León), de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales (BOE núm. 174, de 22 de julio de 1994; c.e. BOE núm. 203, de 25 de agosto de 1994.**

No hay alusiones a recarga artificial, si bien se aprecia una gran preocupación por las zonas húmedas:

Artículo 10

Evaluación de Impacto Ambiental por razón de la localización.-1. Se establece un régimen especial para aquellas zonas denominadas Áreas de Sensibilidad Ecológica, sobre las que, por sus características naturales, los proyectos o actividades pueden tener una mayor incidencia ecológica.

A estos efectos, son Áreas de Sensibilidad Ecológica los Espacios Naturales declarados protegidos en la actualidad; aquellos que lo sean en lo sucesivo de acuerdo con la legislación de Espacios Naturales, y las zonas Húmedas y Riberas, catalogadas como Zonas naturales de Interés Especial.

ANEXO I: Obras, instalaciones o actividades sometidas a Evaluación Ordinaria de Impacto Ambiental (...).

8. Proyectos de drenaje de zonas húmedas naturales o seminaturales.

- **Decreto 194/1994 (Castilla y León), de 25 de agosto, por el que se aprueba el Catálogo de Zonas Húmedas y se establece su régimen de protección (Boletín Oficial de Castilla y León, número 168, de 31 de agosto de 1994)**

El Decreto alude 20 veces a las zonas húmedas en su articulado, sin mención a la recarga artificial.

En su anexo presenta una relación de las zonas húmedas incluidas en el catálogo de zonas húmedas de la Comunidad de Castilla y León, entre las que cabe destacar, por encontrarse incluidas en la zona de estudio:

- Sg-1 Lagunas de Caballo Alba Villeguillo
- Sg-2 Laguna de Las Eras Coca
- Sg-3 Laguna de La Iglesia Coca

- **Decreto 209/1995 (Castilla y León), de 5 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental de Castilla y León (BO Castilla y León núm. 196, de 11 de octubre de 1995)**

No hay alusiones a la A.R., y a las zonas húmedas en términos similares a la Ley 8/1994.

- **Decreto 109/1998 (Castilla y León), de 11 de junio, por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero y se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias (BO Castilla y León, núm. 112, de 16 de junio de 1998; c.e. BO Castilla y León, número 119, de 25 de junio de 1998).**

El Decreto determina qué zonas son *vulnerables* y establece criterios para la elaboración de códigos de buenas prácticas agrarias, sin abordar la recarga artificial y las zonas húmedas específicamente en todo su articulado.

- **Ley 5/1998 (Castilla y León), de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 8/1994, de 24 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales de Castilla y León (BOE núm. 197, de 18 de agosto de 1998).**

Modificación de la Ley 8/1994 guardando una gran consonancia con su línea y sin introducir novedades relativas a recarga de acuíferos o humedales.

- **Ley 10/1998 (Castilla y León), de 5 de diciembre, de Ordenación del Territorio de la Comunidad de Castilla y León (BO Castilla y León, número 236, de 10 de diciembre de 1998; corrección de errores BO Castilla y León núm. 223, de 18 de noviembre de 1999).**

Ley de carácter procedimental que articula las competencias en ordenación del territorio y la estructura del órgano competente.

- **Decreto 55/2002, de 11 de abril, por el que se aprueba el Plan Forestal de Castilla y León. B.O.C. y L. n.º 73. Miércoles, 17 de abril de 2002.**

El Plan Forestal de Castilla y León (en su Programa de Gestión Piscícola) reconoce en su medida V10.1.1.1. la necesidad de promover ante los organismos y departamentos competentes la adaptación de diversas normativas y procedimientos vigentes, las cuales no conforman un marco de protección suficiente para lograr una adecuada conservación de los ecosistemas acuáticos (*Roy et al, 2001*). Para ello se apoya en la Ley Orgánica autonómica 4/1983, de 25 de febrero, cita de forma específica en su artículo 32 la necesidad de proteger los ecosistemas en que se desarrollen las actividades de pesca fluvial y lacustre, acuicultura, caza y explotaciones cinegéticas. En esta misma Ley queda definida la estructura de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León en sus servicios centrales y entre las funciones del Servicio de Caza y Pesca se incluye: “La protección de los ecosistemas acuáticos y la mejora de las poblaciones acuícolas y sus hábitats”

RESOLUCIONES ADMINISTRATIVAS

En este contexto, se han añadido diversas resoluciones administrativas publicadas en boletines oficiales, así como notas de prensa de relevancia:

MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Resolución de la Secretaría General de Agricultura y Alimentación fijando fecha para el levantamiento de actas previas a la ocupación en el expediente de expropiación forzosa del proyecto de recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia). BOE nº 125 de 25 de mayo de 2000, pg 7051.

En esta resolución se informa de la fecha y lugar para el levantamiento de actas previas a la ocupación de bienes y derechos de necesaria utilización para las obras, de acuerdo con el artículo 52 de la vigente Ley de expropiación forzosa.

Resolución de la Secretaría General de Agricultura y Alimentación sobre información pública del proyecto de "Recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)". BOE nº 48 de 25 de febrero de 2000, pg 2458 (Información pública).

En esta resolución son descritas las obras efectuadas y reguladas las disposiciones específicas para la construcción y servicios en sus inmediaciones:

“Por Real Decreto-ley 9/1998, de agosto, se aprueban y declaran de interés general determinadas obras hidráulicas, entre las que se incluyen las obras de ‘Recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)’^a. De conformidad con el artículo 3 del citado Real Decreto-ley, dichas obras llevan implícita la declaración de utilidad pública a los efectos previstos en los artículos 9, 10 y 11 de la Ley de 16 de diciembre de 1954, de Expropiación Forzosa, y la de urgencia, a los efectos de la ocupación de los bienes afectados a que se refiere el artículo 52 de dicha Ley. A estos efectos, esta Secretaría General de Agricultura y Alimentación, Resuelve someter a información pública el proyecto de referencia, cuyas características se detallan a continuación:

Peticionario: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Descripción de las obras:

Azud de retención de 3 metros de altura y 106 metros de longitud en el río Voltoya.

Conducción en tubería enterrada, de fibrocemento de 1.000 mm de diámetro y de 9,8 kilómetros de longitud. La tubería sólo llevará una servidumbre de mantenimiento.

Obras de fábrica inherentes a la tubería (arquetas de desagüe, chimeneas de aireación, etc.) y tramo aéreo de conducción de 40 metros de longitud.

Sistema de recarga constituido por un canal en tierra de 4 metros de anchura y 10,7 kilómetros de longitud.

Camino paralelo al canal de recarga de otros 4 metros de anchura de capa de rodadura con cuneteado.

El proyecto incluye planos parcelarios y relación concreta e individualizada de los bienes y derechos afectados.

La afección a fincas de propiedad privada derivada de las obras de recarga del acuífero, se concreta de la siguiente forma:

Uno. Expropiación forzosa de los terrenos sobre los que se ha de construir las obras en superficie (tramo aéreo de conducción, obras de fábrica inherentes a la tubería enterrada y sistema de recarga con camino paralelo incluido).

Dos. Para la tubería enterrada:

Imposición de servidumbre permanente de acueducto a lo largo del trazado de la conducción, en una anchura de 10 metros, cinco metros a cada lado del eje por donde discorra enterrada la tubería.

Esta franja de terreno estará sujeta a las siguientes limitaciones al dominio:

1. Prohibición de efectuar trabajos de arada a una profundidad superior a 50 centímetros, así como de plantar árboles o arbustos a una distancia inferior a 5 metros del eje de la tubería.

2. Prohibición de realizar cualquier tipo de obras, construcción, edificación o efectuar acto alguno que pudiera dañar o perturbar el buen funcionamiento de las obras, a una distancia inferior a 5 metros del eje del trazado, a uno y otro del mismo. Esta distancia podrá reducirse siempre que se solicite expresamente y se cumplan las condiciones que en cada caso fije el titular de la servidumbre.

3. Libre acceso del personal, maquinaria y equipos necesarios para poder mantener, reparar o renovar las obras con pago, en su caso, de los daños que se ocasionen.

4. Posibilidad de instalar los hitos de señalización o delimitación.

Tres. Ocupación temporal de los terrenos necesarios para la ejecución de las obras, tanto de las de superficie como en las de tubería enterrada.

Lo que se hace público para conocimiento general y especialmente de los propietarios de terrenos y demás titulares afectados, cuya relación está incluida en dicho proyecto; se encuentra expuesta en los tableros de edictos de los Ayuntamientos afectados y además se publica en el Boletín Oficial del Estado, Boletín Oficial de la Provincia de Segovia y en el diario El Norte de Castilla de Segovia, para que puedan examinar el proyecto en la Dirección General de Desarrollo Rural, paseo de la Castellana, número 112, cuarta planta (Madrid) y presentar por triplicado ejemplar en dicho centro, cuantas alegaciones estimen oportunas en los veinte días de plazo siguientes al de la fecha de publicación del presente anuncio.

Madrid, 15 de febrero de 2000.—El Secretario general de Agricultura y Alimentación.—8.060.”

BOLETÍN OFICIAL DE LAS CORTES GENERALES. SENADO. VI LEGISLATURA. Serie I: BOLETÍN GENERAL 25 de febrero de 1999 Núm. 639.

En este apartado se resumen comunicaciones oficiales entre el gobierno y particulares, consideradas relevantes para el fin propuesto.

“Contestación del Gobierno a la pregunta de don ARTURO GONZALEZ LOPEZ, sobre las previsiones del Ministerio de Medio Ambiente con respecto a los proyectos de

recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo y de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia) (684/020329).

684/020329

PRESIDENCIA DEL SENADO

En cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 169 del Reglamento del Senado, se ordena la publicación en el BOLETIN OFICIAL DE LAS CORTES GENERALES de la pregunta número 20.329, seguida de la contestación remitida por el Gobierno, formulada por el Senador del Grupo Socialista, don ARTURO GONZALEZ LOPEZ, sobre las previsiones del Ministerio de Medio Ambiente con respecto a los proyectos de recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo y de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia).

El anuncio de la presentación de la referida pregunta fue publicado en el BOLETIN OFICIAL DE LAS CORTES GENERALES, Senado, Serie I, número 467, 12 de mayo de 1998.

Palacio del Senado, 22 de febrero de 1999.

- La Presidenta del Senado, Esperanza Aguirre Gil de Biedma.
- La Secretaria primera del Senado, María Cruz Rodríguez Saldaña.

A la Presidencia del Senado

Arturo González López, Senador por Segovia, perteneciente al Grupo Parlamentario Socialista, al amparo de lo dispuesto en los artículos 160 y 169 del Reglamento de la Cámara, tiene el honor de presentar la siguiente pregunta al Gobierno, para la que desea obtener respuesta escrita.

Los proyectos de recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo y de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia), se encuentran paralizados en el Ministerio de Medio Ambiente por falta de financiación.

¿Qué previsiones tiene el Ministerio respecto a estas obras?

Palacio del Senado, 28 de abril de 1998.

--Arturo González López.

Excm. Sra.: A los efectos del artículo 169 del Reglamento del Senado, se traslada respuesta del Gobierno respecto al asunto de referencia.

(684) Pregunta escrita Senado.

684/020329.

AUTOR: González López, Arturo (GS).

Asunto: Previsiones del Ministerio de Medio Ambiente con respecto a los proyectos de recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo y de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia).

Respuesta:

El Real Decreto-Ley 9/1998, de 28 de agosto, por el que se aprueban y declaran de interés general determinadas obras hidráulicas, incluye en su artículo 2 las actuaciones previstas en el «Proyecto de trasvase del río Cega a la comarca del Carracillo (Segovia)» y el «Proyecto de recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)».

Al disponer el anterior artículo que, al objeto de establecer su régimen de financiación, será de aplicación la clasificación que de las mismas haya establecido cada Comunidad Autónoma, la Confederación Hidrográfica del Duero del Ministerio de Medio Ambiente ha remitido el 26 de noviembre de 1998 los expedientes antes referidos a la Dirección General de Infraestructuras Agrarias de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.

Madrid, 15 de febrero de 1999.

--El Secretario de Estado de Relaciones con las Cortes.

BOLETIN OFICIAL DE LAS CORTES GENERALES. SENADO. VII LEGISLATURA. Serie I: BOLETIN GENERAL 10 de noviembre de 2000 Núm. 90.

684/001104

A la Presidencia del Senado:

Arturo González López, Senador por Segovia, perteneciente al Grupo Parlamentario Socialista, al amparo de lo dispuesto en los artículos 160 y 169 del Reglamento de la Cámara, tiene el honor de presentar las siguientes preguntas al Gobierno, para las que desea obtener respuesta escrita.

Los proyectos de recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo y de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia), se encuentran paralizados en el Ministerio de Medio Ambiente por falta de financiación.

¿Qué previsiones tiene el Ministerio respecto a estas obras? ¿Cuál es la fecha de aprobación del expediente administrativo? ¿Qué pasos se han dado hasta el momento en relación a este proyecto? ¿Qué cantidades debe aportar cada una de las Administraciones Central y Junta de Castilla-León, para la realización de estos proyectos?

Palacio del Senado, 21 de mayo de 1998.

- Arturo González López.

Excmo. Sr.: A los efectos del artículo 169 del Reglamento del Senado, se traslada respuesta del Gobierno respecto al asunto de referencia.

(684) Pregunta escrita Senado.

684/020995.

AUTOR: González López, Arturo (GS).

Asunto: Previsiones del Ministerio de Medio Ambiente con respecto a las obras de recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo y de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia), con indicación de su financiación.

Respuesta:

El Proyecto de recarga de los acuíferos de la comarca del Carracillo (Segovia) con un presupuesto de 1.317,9 millones de pesetas, se encuentra ya aprobado junto con su correspondiente expediente de Información Pública, si bien ha sido objeto de recurso contencioso-administrativo y de queja 98/4113 ante la Unión Europea.

El Proyecto de recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia), con un presupuesto de 722,7 millones de pesetas, se encuentra aún pendiente de aprobación.

Dado que ambas actuaciones van a ser financiadas con Fondos de Cohesión de la Unión Europea, es previamente necesario que se emita el preceptivo «Certificado de Incidencia Ambiental».

Madrid, 31 de julio de 1998.

- El Secretario de Estado de Relaciones con las Cortes.

Con todo lo expuesto, se considera aclarada tal atribución: la recarga artificial puede y debe ser considerada un vertido, en sentido amplio.

El RLA determina En el artículo 254, apartado 4 que las autorizaciones de vertido limitarán rigurosamente las concentraciones de las sustancias figuradas en la relación I, con objeto de eliminar los efectos nocivos en el medio receptor. Las sustancias de la relación II quedarán sujetas a autorización de acuerdo con los respectivos Planes Hidrológicos de cada cuenca”. De este modo queda definida la necesidad de establecer un estándar de calidad para las aguas de recarga.

El PHD es la disposición que más aboga por la técnica de la AR, si bien designándola “técnicas especiales”. Del mismo modo planifica y manifiesta una sólida proposición por llevar a cabo estudios y actuaciones relativas a su aplicación, y por la protección de las zonas húmedas de la cuenca.

La Directiva 2000/60/CE o D.M ha representado un hito en la historia de la Comunidad Europea, al poner un plazo para conseguir un estado cualitativo en aguas continentales y litorales. Define además con estándares de calidad el “estado ecológico de las aguas”, el “buen estado de las aguas” y otros términos que quedan acuñados e integrados en la literatura hidrogeológica. Considera además el empleo de nuevas técnicas y herramientas, como puede ser la modelación como medio para conseguir los objetivos propuestos.

En el PHN no se plantea la recarga artificial como una alternativa complementaria a los fines previstos, como ejemplo más dentro del carácter rígido de la ley. Exclusivamente en su apartado 3: “Análisis hidrológicos”, menciona la recarga artificial en el delta del Llobregat.

En cuanto a aspectos medioambientales, hay un tomo completo abordando la situación. En lo relativo a humedales, la Ley, recogiendo la filosofía del Libro Blanco del Agua 2000, pone especial énfasis en garantizar un uso racional y sostenible de los recursos hidráulicos, preocupación que se trasluce a lo largo de todo su articulado. Entre éstos por su singularidad merecen especial mención la gestión eficaz de las aguas para abastecimiento, la exigencia de máxima eficiencia en la gestión del recurso en las cuencas receptoras, la regulación de las reservas hidrológicas por motivos ambientales, la gestión de las sequías y regulación de zonas inundables, protección de las aguas subterráneas y conservación de humedales y actuaciones de sensibilización, formación y educación en el uso sostenible del agua.

La gestión de los humedales queda parcialmente regulada, obligando a la creación de un sistema de investigación y control para determinar los requerimientos hídricos necesarios que garanticen la conservación de los humedales, así como promover su recuperación, regeneración de sus ecosistemas y aseguramiento de su pervivencia futura.

Dentro de los comentarios suscitados por la Ley, y como ejemplo de los muchos trabajos realizados, existen tratamientos específicos a la recarga artificial, en los que los autores denuncian la falta de propuestas de medidas para recuperar y realimentación los

sistemas sobreexplotados, empleando para ello la recarga artificial directa (superficial o subterránea), o inducida (obras hidráulicas específicas). Las denuncias ante la falta de confianza en esta tecnología, muy probablemente por desconocimiento de sus potencialidades, son sobresalientes, (Fernández Rubio, 2001, Villarroya, 2002).

En el análisis léxico-gráfico del PNR no se han detectado alusiones a recarga artificial, zonas húmedas o humedales, si bien manifiesta una intención puramente ecológica de incorporar criterios ambientales en la gestión de zonas de regadíos para evitar la degradación de las tierras, favorecer la recuperación de acuíferos y espacios naturales valiosos, proteger la biodiversidad y los paisajes rurales y reducir los procesos de desertización.

El RD 606/2003 esclarece la necesidad de autorización para las operaciones de recarga artificial de acuíferos, indicando que sólo podrán otorgarse cuando con ellas no se provoque la contaminación de las aguas subterráneas.

La Ley 4/89 indica la necesidad y obligatoriedad de elaborar y mantener actualizado un inventario de zonas húmedas y conocer su evolución.

La ley 16/2002 supone la trasposición de la Directiva 96/61/CE, conocida como ICCP. Sin alusiones específicas a la recarga artificial, ya en su preámbulo manifiesta, como uno de sus objetivos, articular el procedimiento administrativo para cualquier vertido a las aguas.

Los decretos autonómicos determinan qué zonas son *vulnerables* y establece criterios para la elaboración de códigos de buenas prácticas agrarias, sin abordar ni la recarga artificial ni las zonas húmedas específicamente en todo su articulado, salvo para su inventario y catalogación.

El Plan Forestal de Castilla y León reconoce la necesidad de promover ante los organismos y departamentos competentes la adaptación de diversas normativas y procedimientos vigentes, como es la Ley Orgánica autonómica 4/1983, para lograr una adecuada conservación de los ecosistemas acuáticos, especialmente aquellos en los que se desarrollen las actividades de pesca fluvial y lacustre, acuicultura, caza y explotaciones cinegéticas. En esta misma Ley organiza el Servicio de Caza y Pesca de la JCL, incluyendo en sus actividades la protección de los ecosistemas acuáticos y la mejora de las poblaciones acuícolas y sus hábitats.

BLOQUE 1. CONTEXTUALIZACIÓN

ANEXO 1.2.- DEMOGRAFÍA Y PATRIMONIO DE LA ZONA DE ESTUDIO



1.1.1. Patrimonio cultural

Villagonzalo de Coca: En su ermita, imagen románica de Ntra. Sra. De Negrillán, patrona de la Comunidad.

Bernuy de Coca: Interesante retablo barroco en su iglesia parroquial.

Villeguillo: Iglesia parroquial, dedicada a san Pedro apóstol, con una interesante colección de piezas de plata.

Ciruelos de Coca: Iglesia parroquial de San Cipriano, con caliz y cruz de plata del siglo XVI.

Villagonzalo de Coca: Escultura románica de la Virgen de Neguillán (iglesia de san Juan Bautista).

Santiuste de San Juan Bautista: Iglesia románica de san Juan Bautista. Cristo templario del siglo XII y cruz de plata realizada en 1618 por Antonio de Olmedo.

Coca: Ciudad histórica con un gran legado patrimonial:

- Verracos celtíberos hechos en granito (Edad del Hierro).
- Restos de la muralla medieval, donde se conservan tres torreones y la Puerta de la Villa.
- Castillo mudéjar: erigido en 1453 por orden de Alonso de Fonseca, arzobispo de Sevilla y señor de Coca y Alaejos. Es de planta cuadrada con foso y triple recinto; en el segundo se encuentra la torre del homenaje.
- Ayuntamiento, de estilo neomudéjar (1927-1930).
- Torre románica de la iglesia de San Nicolás.
- Iglesia Santa María la Mayor, de finales del gótico. Sepulcros renacentistas de la familia de los Fonseca (señores de la villa), realizados en mármol de Carrara por los escultores Domenico Fancelli y Bartolomé Ordóñez, en 1520.

1.1.1.1. Puntos de Interés Natural

- Moraleja de Coca: Cauce del río Voltoya.
- Santiuste: Presencia de aguilucho cenizo.
- Ciruelos y, en general, para toda la zona: Presencia de alondras y abutardas.
- Villeguillo: Laguna de Caballo de Alba, de interés ecológico.
- Navas de Oro: Lagunas de interés para las aves migratorias.
- Villagonzalo de Coca: Laguna de la Iglesia, Laguna de las Eras y Laguna de Valderruedas, de interés para las aves migratorias.
- Bernuy de Coca: Colonia de cernícalos en la torre de la iglesia parroquial.



1.1.1.2. Puntos de Interés Agropecuario

- Moraleja de Coca: Vinos.
- Santiuste: Vinos de la denominación de origen “Rueda.”

1.1.1.3. Vegetación y fauna de la Comunidad

En el sector Este de la *Cubeta* se localiza una extensa área de pinos conformada por dos especies: el pino piñonero o albar (*Pinus pinea*) y pino resinero o negral (*Pinus pinaster*), siendo mucho más abundante el segundo, que es la base de la industria local de obtención de aguarrás y colofonia obtenida de su resina. Además se aprovecha en la obtención de madera, leña para autoconsumo y venta, pez, carbón, piñón y recolección de setas..., lo que ha representado para la Comunidad un buen complemento económico. Actualmente el pinar está ordenado y gestionado desde la Casa Forestal “Sequero de Coca.”

Junto a las riveras se encuentran importantes masas de chopos, fresnos y sauces, que conforman los bosques de galería en los principales cauces de la zona.

Aunque es en las laderas de los ríos, entre el nivel de los álamos y de los pinos, donde la variedad vegetal es más abigarrada y sorprendente: avellanos, quejigos, sabinas, endrinos, robles y otras variedades caducifolias que aprovechan la abundancia de agua que, en forma de manantiales, fluyen desde el pinar a los ríos.

La recolección de setas se ha convertido en una actividad económica de gran importancia para la zona. La especie más buscada es el níscolo (*Lactarius deliciosus*)

En cuanto a la fauna, es de destacar toda la relacionada con la zona de pinares: liebres, ardillas, jabalí, conejos, etc. Entre las rapaces destacan el ratonero común, el águila calzada y milano negro y real, que encuentran aquí lugar de cría y de caza. Entre los córvidos: urracas, cuervos, grajos, rabilargos, además de otras muchas aves como palomas torcaces, tórtolas, abubillas, picapinos, carboneros, herrerillos, trepadores, alcaudones, cárabos, autillos, etc. En las riveras: petirrojos, chochines, ruiseñores y mirlos.

1.1.2. Demografía

En vista de los objetivos propuestos, no parece procedente realizar un análisis socioeconómico, si bien cabe apuntar algunas pinceladas para el conocimiento más preciso del marco físico.

Los datos de población y estudios demográficos son indicadores indirectos de la evolución económica de una zona.

Tal como se puede apreciar en las tablas de población, Navas de la Asunción y Coca son las poblaciones más pobladas de la Comunidad. Su población (entre 2000 y 2500 habitantes) ha sido estable desde los años 60, lo que puede ser indicativo de la prosperidad económica de la zona.



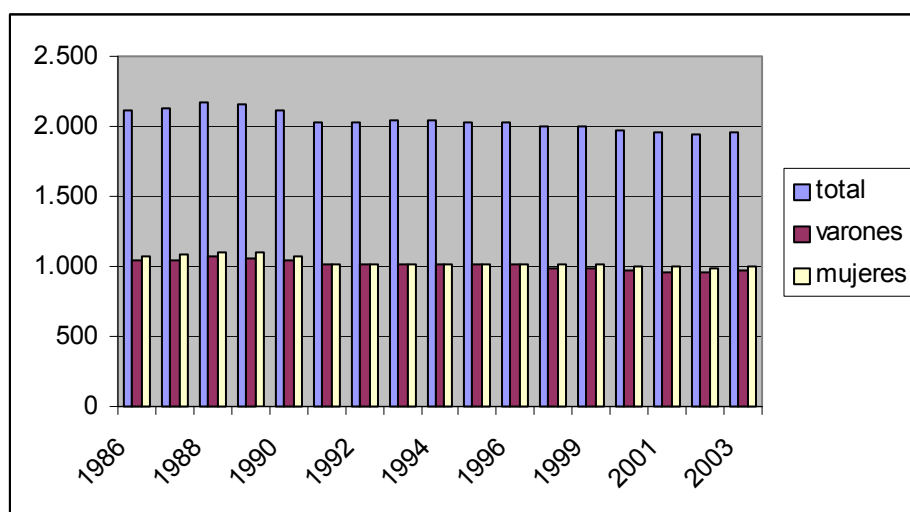
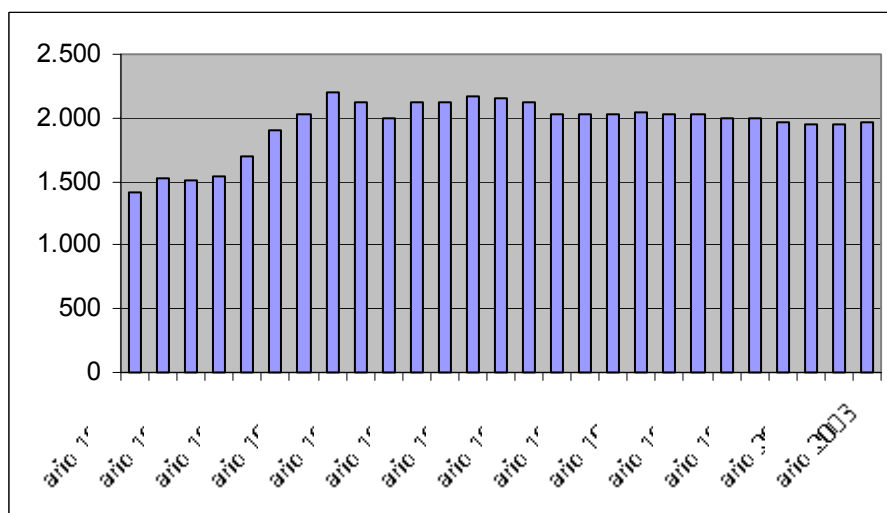
Caso contrario es el que presentan las poblaciones más pequeñas, como Villeguillo y Fuente de Santa Cruz, en las que a partir de este mismo año, 1960, su población se ve muy disminuida, no llegando a superar, desde entonces, los 200 habitantes.

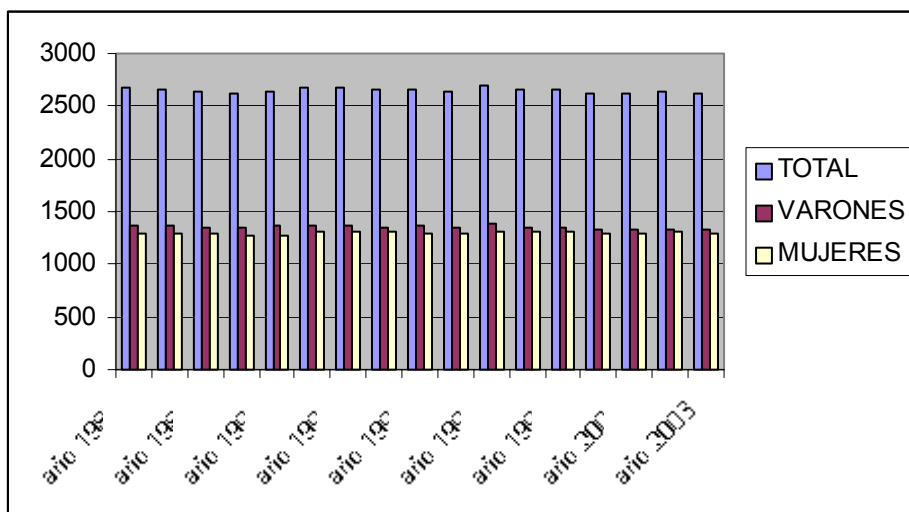
La relación varones/mujeres es muy similar en todas las poblaciones, estando muy equiparado.

1.1.2.1. Gráficas de población

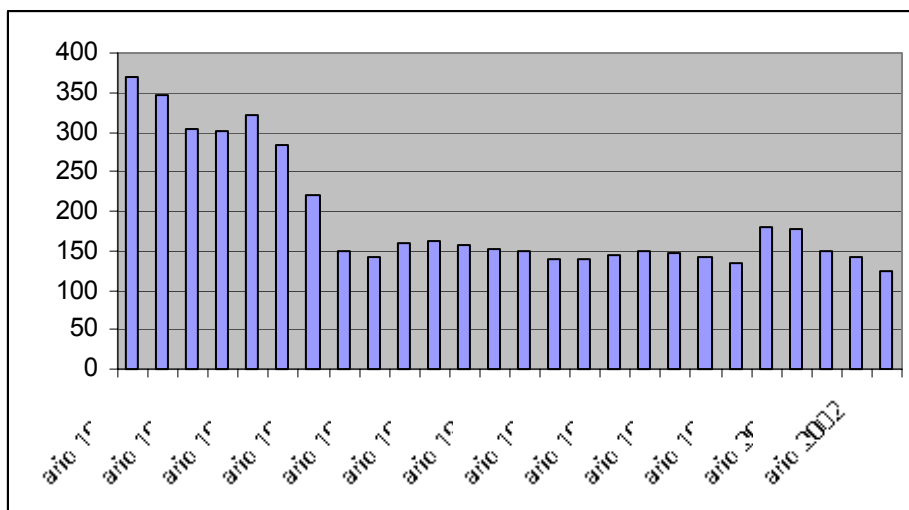
Las siguientes gráficas reflejan la evolución de la población a lo largo del último siglo. Con su realización, se pretende conocer las épocas de los principales movimientos migratorios, estudiando los factores más influyentes de la historia del siglo XX que ha podido provocarlos. Estas gráficas quedan representadas en las figuras 1 a 11.

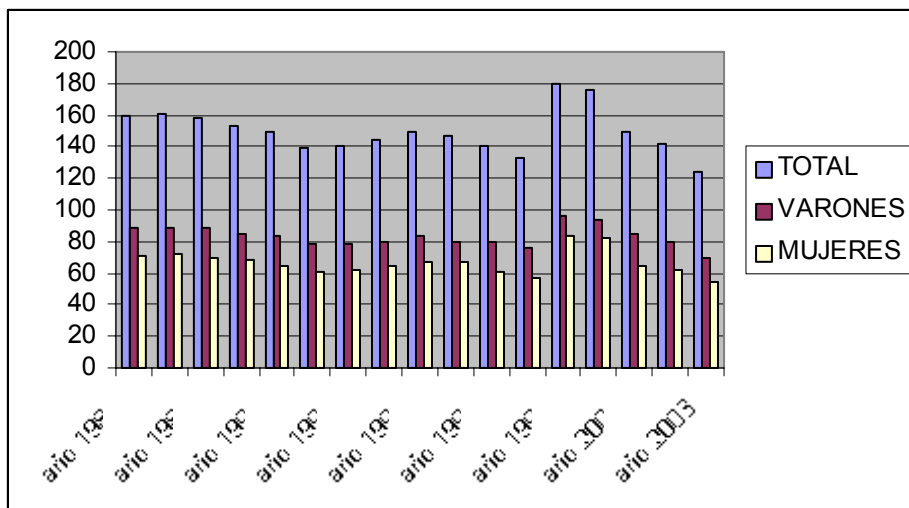
Coca



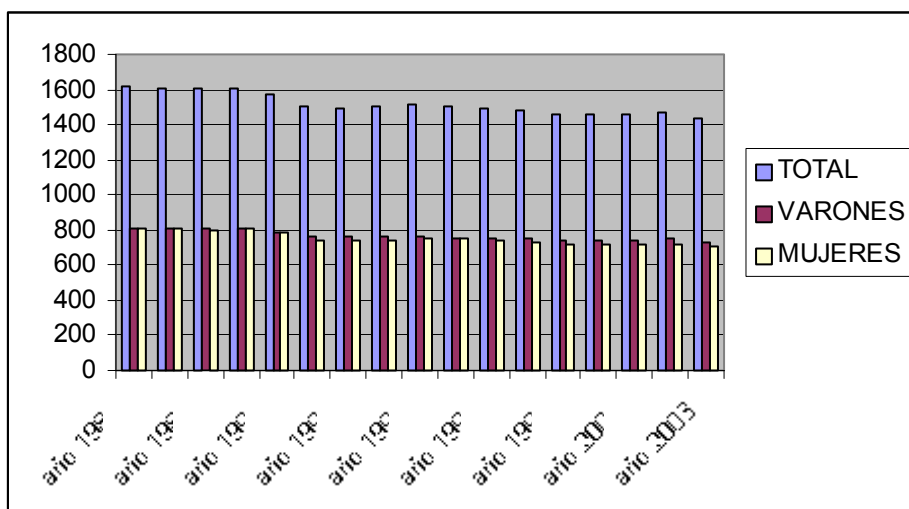
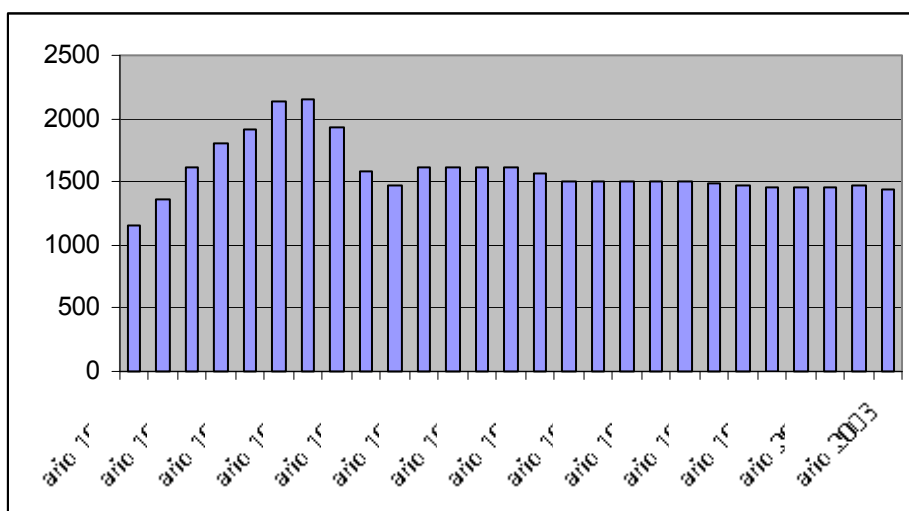


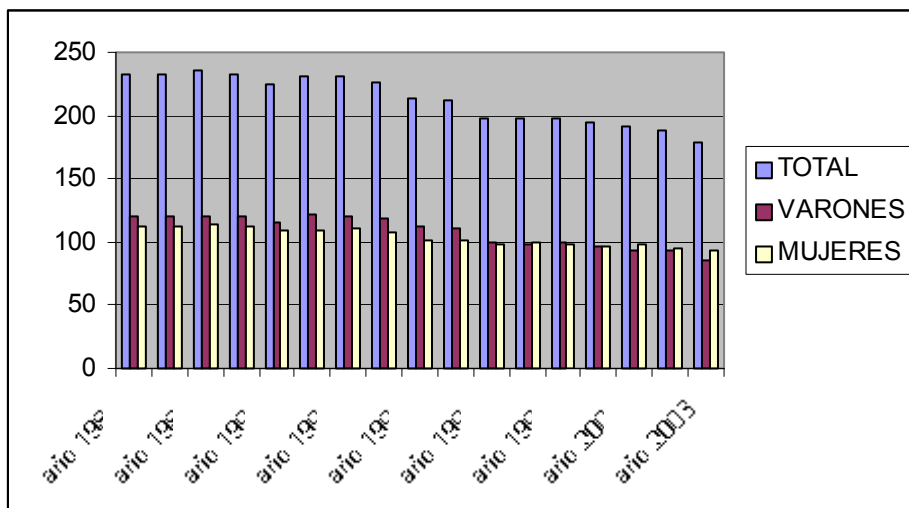
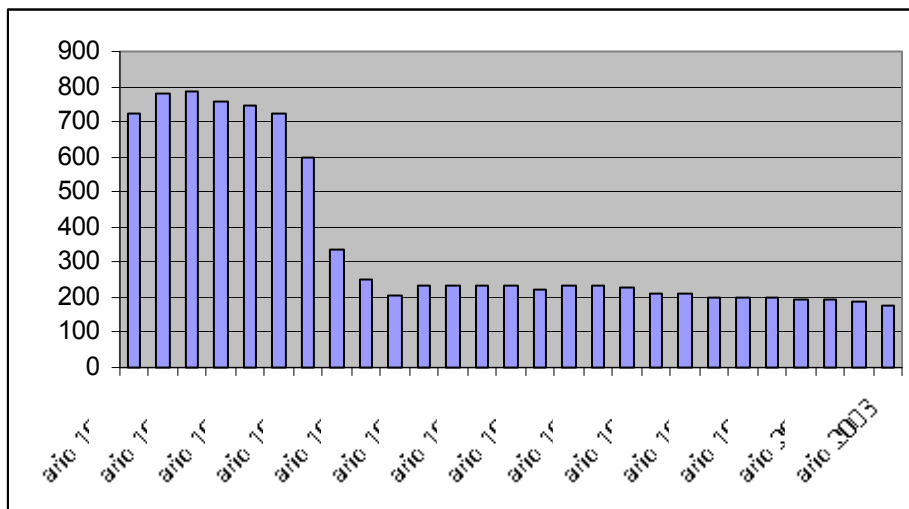
Villeguillo



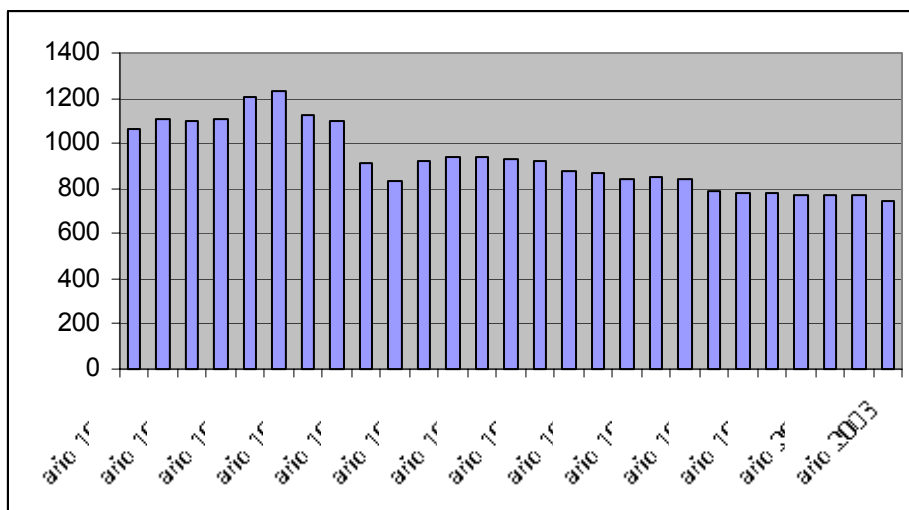


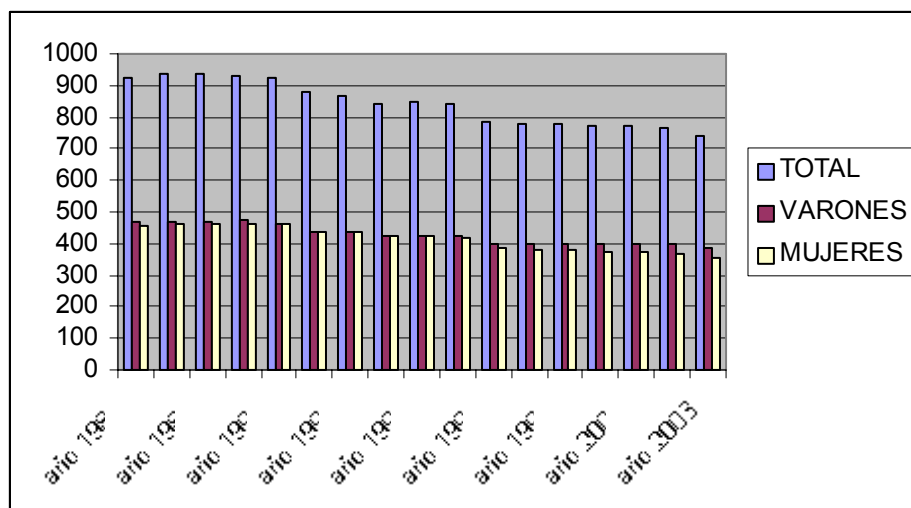
Navas de Oro





Santiuste de San Juan Bautista





Figs. 1 a 11. Histogramas de evolución de la población de las localidades de la zona de estudio, en orden de presentación Coca, Nava de la Asunción, Villeguillo, Navas de Oro, Fuente de Santa Cruz y Santiuste de San Juan Bautista

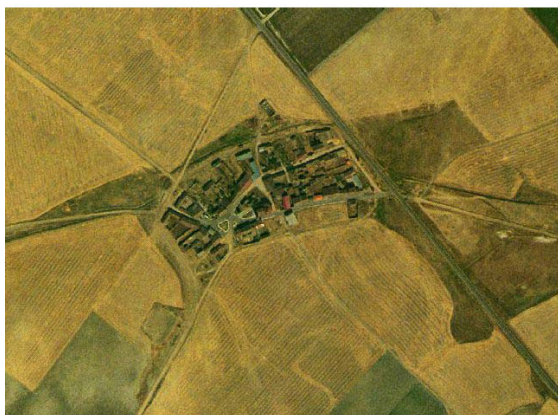
Como rasgo más destacable cabe mencionar la disminución de la población coincidiendo con los períodos de mayores sequías históricas, manifestadas en forma de penuria para los agricultores, quienes encuentran problemas para alumbrar el agua por su escasez, distribución y carestía. Estas sequías se han presentado a primeros de los años 80 y segundo quinquenio de los 90.

Para completar el apartado se han realizado dos hojas de contactos donde se presenta el aspecto de las iglesias de las localidades que comprenden la zona de estudio, y una vista aérea de las localidades, ya que ambos factores son de gran aceptación popular (figs. 1.78. y 1.79.).

En las páginas siguientes:

Figs. 12 A a H. Vista aérea de las localidades de la zona de estudio (verano de 2000).

Figs. 13. A a K. Aspecto de las iglesias y otros elementos de interés cultural de la zona de estudio.



Bernuy5000.jpg



Ciruelos5000.jpg



Coca-12500.jpg



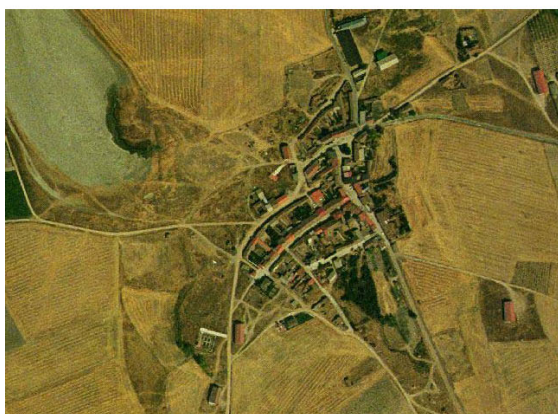
LLano5000.jpg



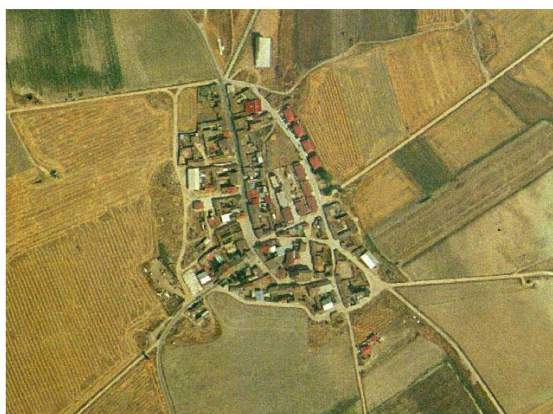
Moraleja5000.jpg



Santiuste1200.jpg



Villagonzalo5000.jpg



Villeguillo-5000.jpg

Figs. 12 a-h. Vista aérea de las localidades de la zona de estudio (verano de 2000).



Ciruelos de Coca.JPG



Coca.JPG



Exmo. Ayto. Coca 2.JPG



Exmo. Ayto. Coca 3.JPG



Exmo. Ayto. Coca.JPG



Llano de Olmedo.JPG



Santiuste de San J&B 2.JPG



Santiuste de San J&B.JPG



Villagonzalo de Coca 2.JPG



Villagonzalo de Coca.JPG



Villeguillo.JPG

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.1. LINEAMIENTOS DEDUCIDOS POR FOTOINTERPRETACIÓN



ANEXO 2.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LINEAMIENTOS SOBRE FOTOGRAMAS A DISTINTAS ESCALAS

En este apartado se expone e interpreta toda la información gráfica empleada para deducir los lineamientos que han afectado a la zona de estudio.

Para ello se han diferenciado tres escalas de trabajo: regional para el acuífero de los Arenales, Intermedia para la Cubeta de Santiuste y una franja aledaña, y local para los distintos sectores de la *Cubeta* (Unidades Hidroambientales).

A continuación se presenta la documentación gráfica empleada y la metodología seguida. Al final del anexo se adjuntan los datos deducidos de los distintos métodos.

A) Escala regional

Los antecedentes tectónicos han sido extraídos de la memoria explicativa de las Hojas 16-17 (428), Olmedo y 16-18 (455), Arévalo, de la serie MAGNA (*IGME, 1982d*).

En la memoria de dichas hojas se describe cómo el basamento preterciario se comporta como un elemento rígido que responde a las diferentes fases de la Orogenia Alpina, fracturándose y compartimentándose en bloques según cuatro direcciones preferentes: **SSO-NNE, NNO-SSE, N-S y E-O** (*IGME, 1982d*).

Un detalle a tener en cuenta con respecto a las alineaciones que se observan en fotogeología es el paralelismo con las fallas del basamento, especialmente con las de orientación N-30° E. Estos valores fueron constatados en una campaña de prospección geofísica realizada por el IRYDA (*IRYDA, 1990*).

La más importante de estas fracturas es la falla de Alba-Villoria (SSO-NNE), comprobada por datos geológicos (*AEROSERVICE Ltd., 1966*), que separa dos dominios de la Unidad de Los Arenales:

- El sector occidental, al oeste de la falla, donde se localizan sedimentos del Paleógeno.
- El sector oriental, en el que predominan sedimentos del Mioceno Medio y Superior.

Esta falla ha actuado durante el Terciario como falla normal, en la que el bloque hundido es el oriental y presenta un salto máximo de 800 m, condicionando toda la sedimentación terciaria de esta zona, y subsiguientemente, el comportamiento hidrogeológico de la Unidad de Los Arenales.

Las ortoimágenes elegidas con los lineamientos interpretados sobrepuestos se presentan a continuación (Figs. 1 a 3). el rectángulo amarillo circunscribe la zona de estudio.

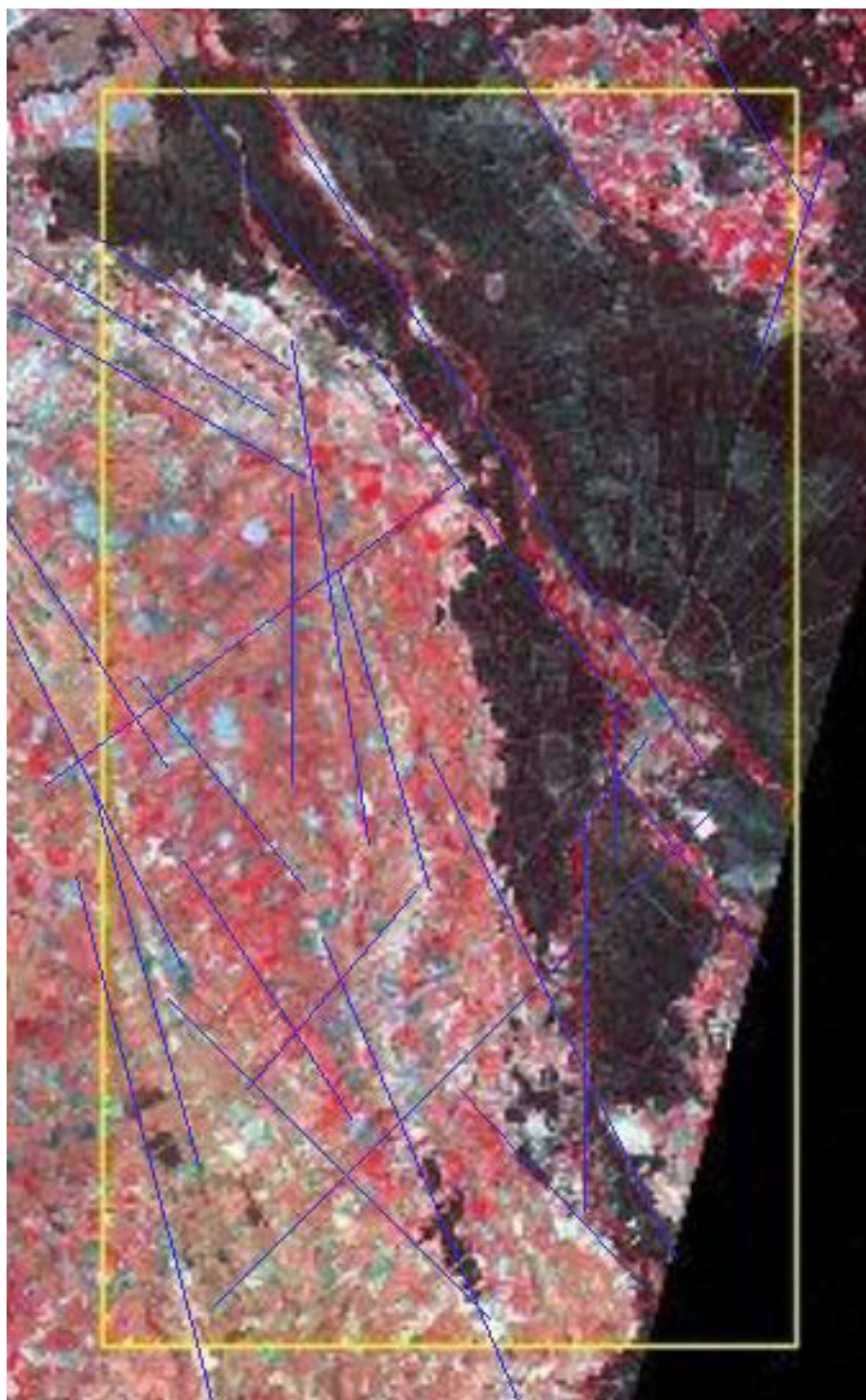


Fig. 1. Orientación en planta de los principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre la ortoimagen espacial a escala 1:800.000, n.º 612 de 1991. Imagen Spot de órbita 031 con 3731 columnas, sensor multiespectral y bandas 1, 2 y 3 de 12 de junio de 1991. Escala de representación aproximada 1:500.000.

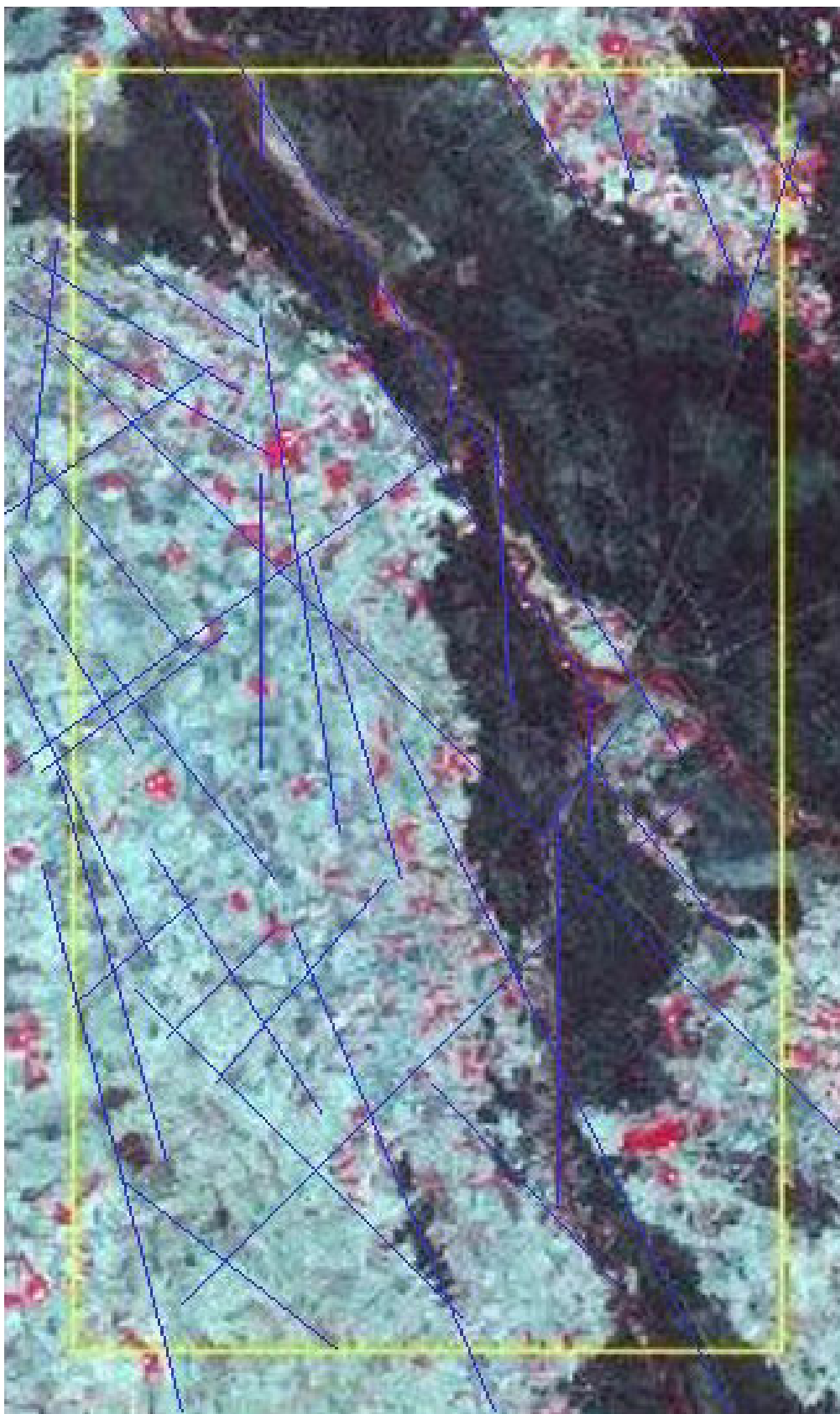


Fig. 2. Orientación en planta de los principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre la ortoimagen espacial a escala 1:800.000, n.º 802 de 2000. Imagen Spot 2 de órbita 032 con 3521 filas y 3888 columnas, datum ED 50, bandas 1, 2 y 3 de 2 de agosto de 2000. Escala de representación aproximada 1:500.000.

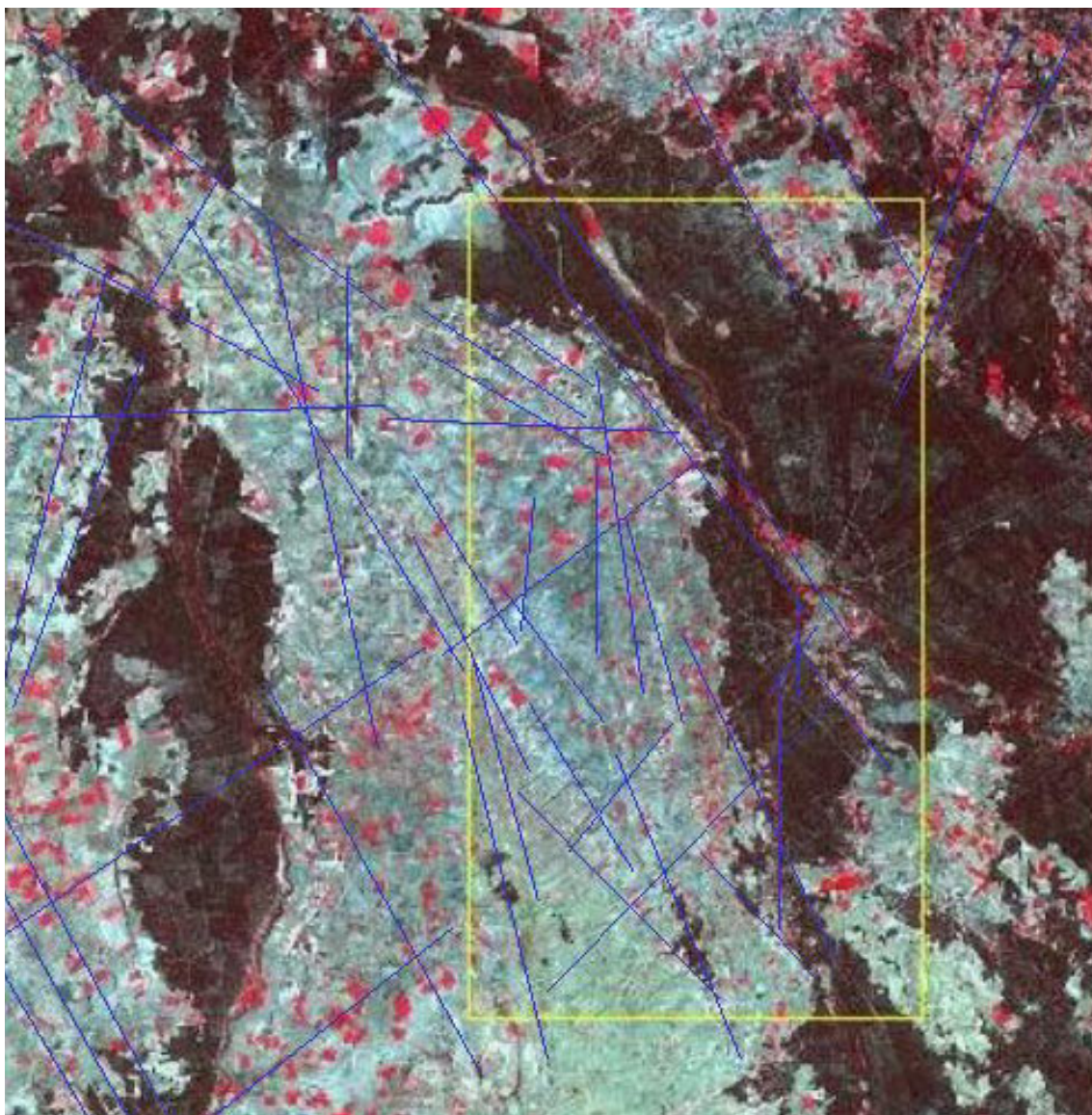
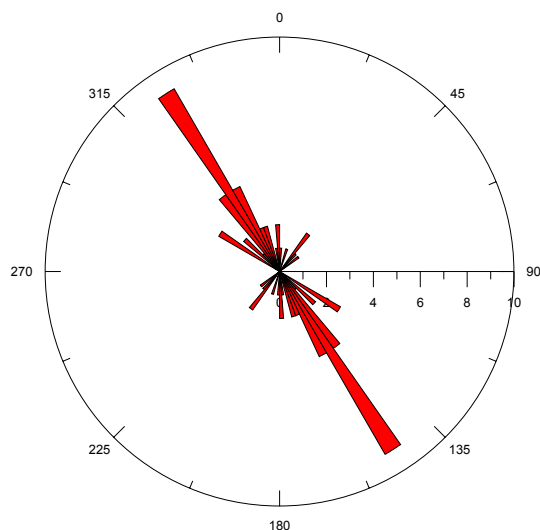


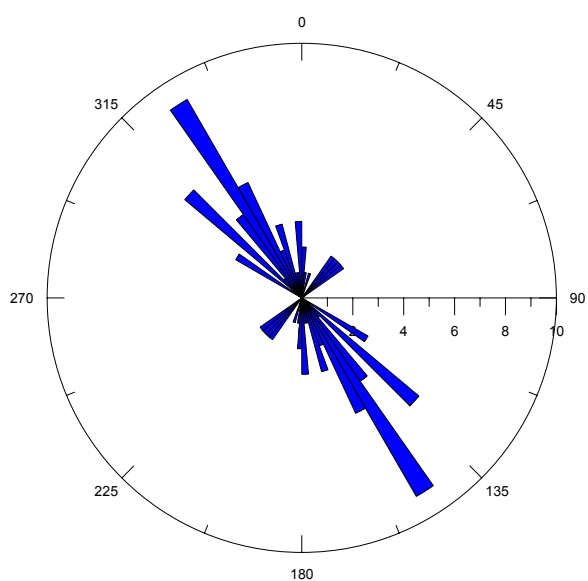
Fig. 3. Orientación en planta de los principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre la ortoimagen espacial a escala 1:800.000, n.º 803c de 2002. Imagen Landsat de órbita 202 con 3386 filas y 3781 columnas, órbita 202, sensor multiespectral píxel 2D, bandas 1 a 7-9, Datum ED 50. Escala de representación aproximada 1:500.000.

Se ha medido la orientación de los lineamientos y realizado un tratamiento estadístico con ellos, empleando para tal cometido las rosas de fracturación de las figuras 4 a-c.

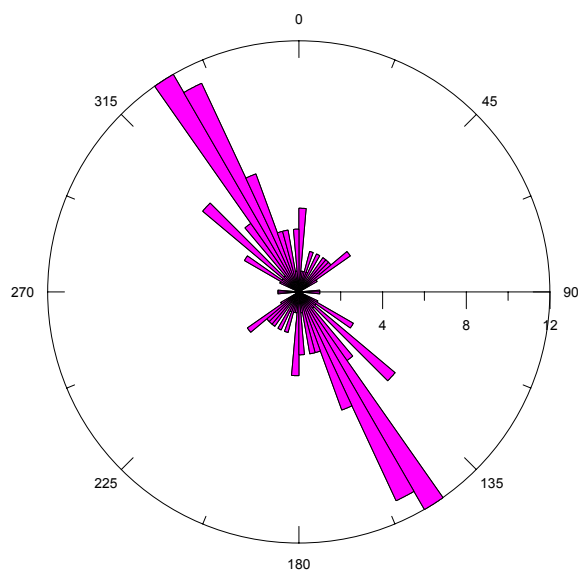
1991



2000



2002



Figs. 4. a-c Representación gráfica de las rosas de fracturación. Lineamientos deducidos sobre ortoimágenes de 1991, 2000 y 2002.

En ellas se puede apreciar que:

- La orientación preferencial de los principales lineamientos es la NO-SE hacia NNO-SSE (orientación habitual para lineamientos tardihercínicos).
- Los lineamientos tienen, en algunos casos, escala regional.
- Ocasionalmente aparecen estructuras de orientación ENE-OSO.

B) Escala intermedia o subregional

Comprende la Cubeta de Santiuste y una franja aledaña. Los principales lineamientos y estructuras observados en el bloque diagrama a escala 1:800.000 están representados en la figura 5. De estos lineamientos, la mayor parte coinciden con anomalías geomorfológicas o con elementos estructurales.

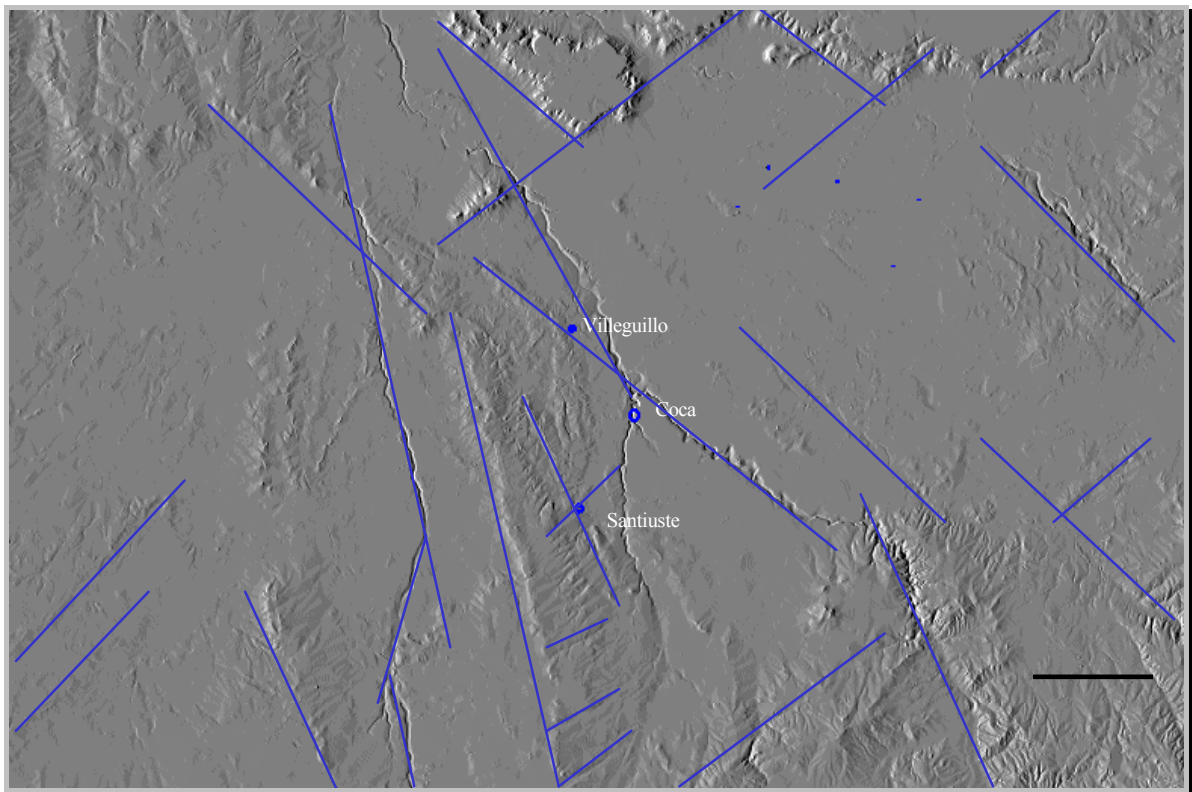


Fig. 5. Orientación en planta de los principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre el bloque diagrama en 2,5 D generado a partir del MDT a escala 1:800.000. Escala aproximada de la figura: 1:300.000.

Tras medir la orientación de los lineamientos, se ha realizado un nuevo tratamiento estadístico con ellos, representando los resultados en una rosa de fracturación (Fig. 6).

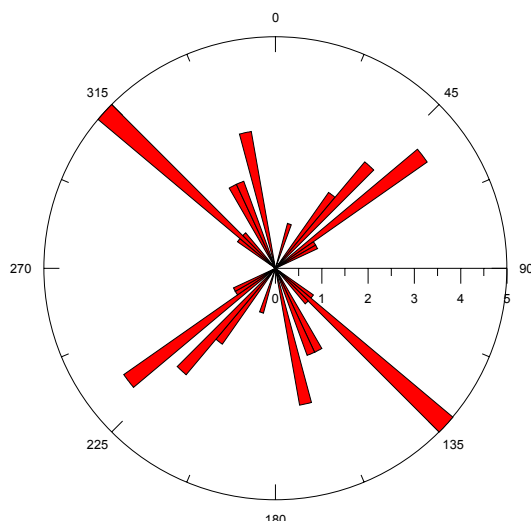


Fig. 6. Rosa de fracturación y representación conjunta de todos los lineamientos fotointerpretados.

De acuerdo con esta herramienta, se deduce que los principales lineamientos a escala intermedia también son de orientación NO-SE. Secundariamente aparecen estructuras de orientación NE-SO, que, al igual que en el caso anterior, parecen guardar relación con la estructuración de la tectónica de basamento. Aparecen además lineamientos norteados. Estas orientaciones corresponden claramente a las directrices hercínicas, una principal NO-SE y una conjugada secundaria NE-SO.

C) Escala local

Esta escala comprende la Cubeta de Santiuste propiamente dicha. Se han seleccionado las dos zonas con mayor evidencia de actividad tectónica, que coinciden con el trazado del río Eresma a su paso por Villeguillo (sector norte de la *Cubeta*) y del río Voltoya a su paso por Santiuste de San Juan Bautista (sector sur).

En los fotogramas del “vuelo americano” de 1957, a escala 1:33.000, se deduce una mayor cantidad de lineamientos que en los fotogramas restantes de 1987 y 2000, por abarcar una zona mayor y por encontrarse una mayor proporción del terreno sin labrar, de modo que la geomorfología se encontraba menos antropizada.

De todas las figuras visionadas, se han seleccionado y fotointerpretado tres por su alta representatividad del sector o Unidad Morfogenética donde fueron tomadas (Figs. 7 a 9).

La primera corresponde al sector sur del acuífero, en las afueras de la localidad de Santiuste, donde el río Voltoya presenta una sinuosidad alta y hay rezumes y manantiales en su margen izquierda (zona del lavadero, camino del Ramirón, etc.).

La segunda corresponde a la zona de confluencia de los ríos Voltoya y Eresma, zona de singular importancia. Por tanto, este sector recibe un tratamiento detallado en el Apartado 5.4.3.2. (Anomalías geomorfológicas).

La tercera corresponde al sector septentrional de la *Cubeta*, zona drenada por el río Eresma, cuyos lineamientos guardan una cierta similitud con los del sector meridional.

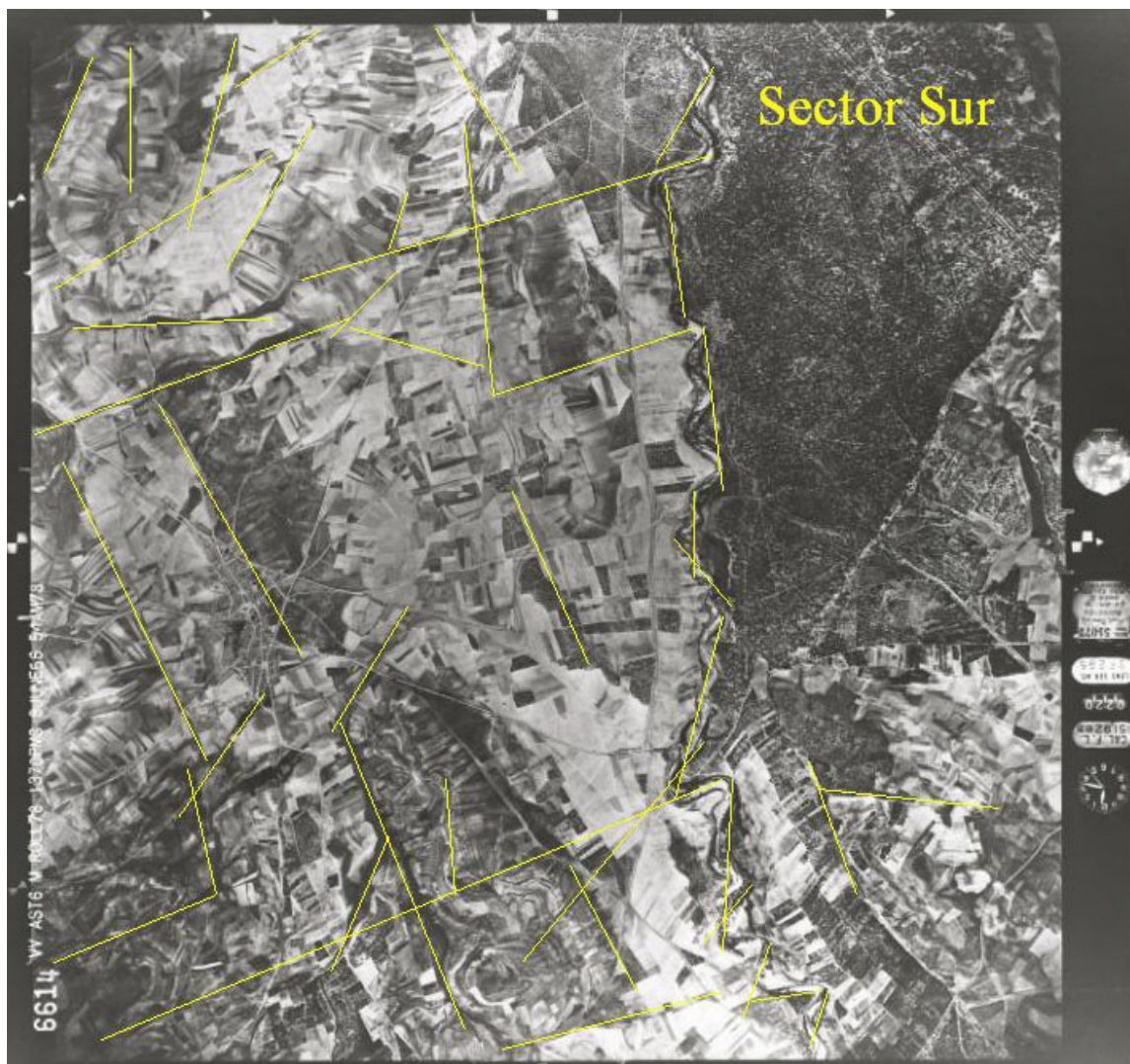


Fig. 7. Orientación en planta de las principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre los fotogramas del “vuelo americano” de 1957, a escala 1:33.000. Sector sur. Escala aproximada de la figura 1:45.000.

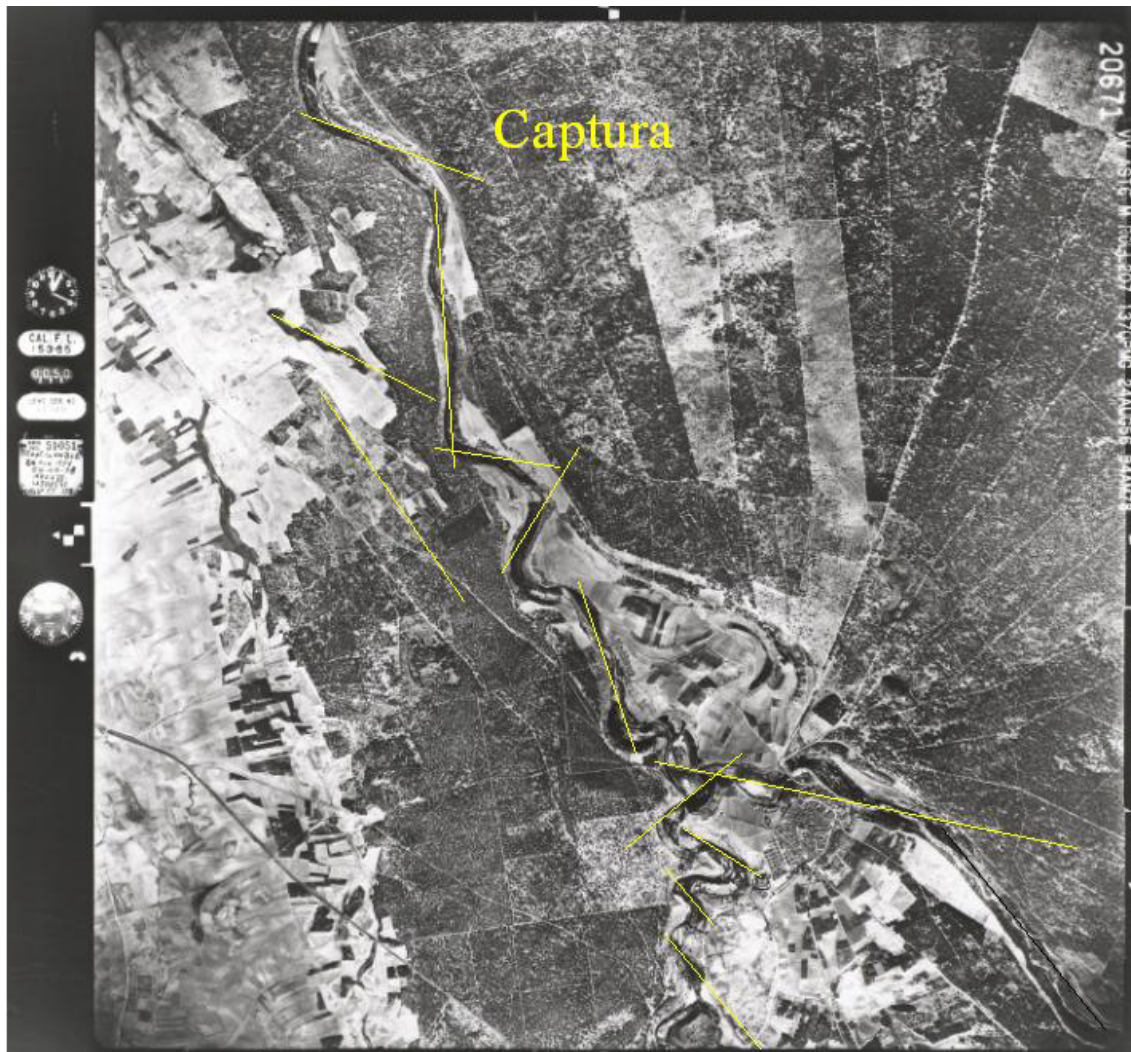


Fig. 8. Orientación en planta de las principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre los fotogramas del “vuelo americano” de 1957, a escala 1:33.000. Sector central-este. Escala aproximada de la figura 1:45.000.

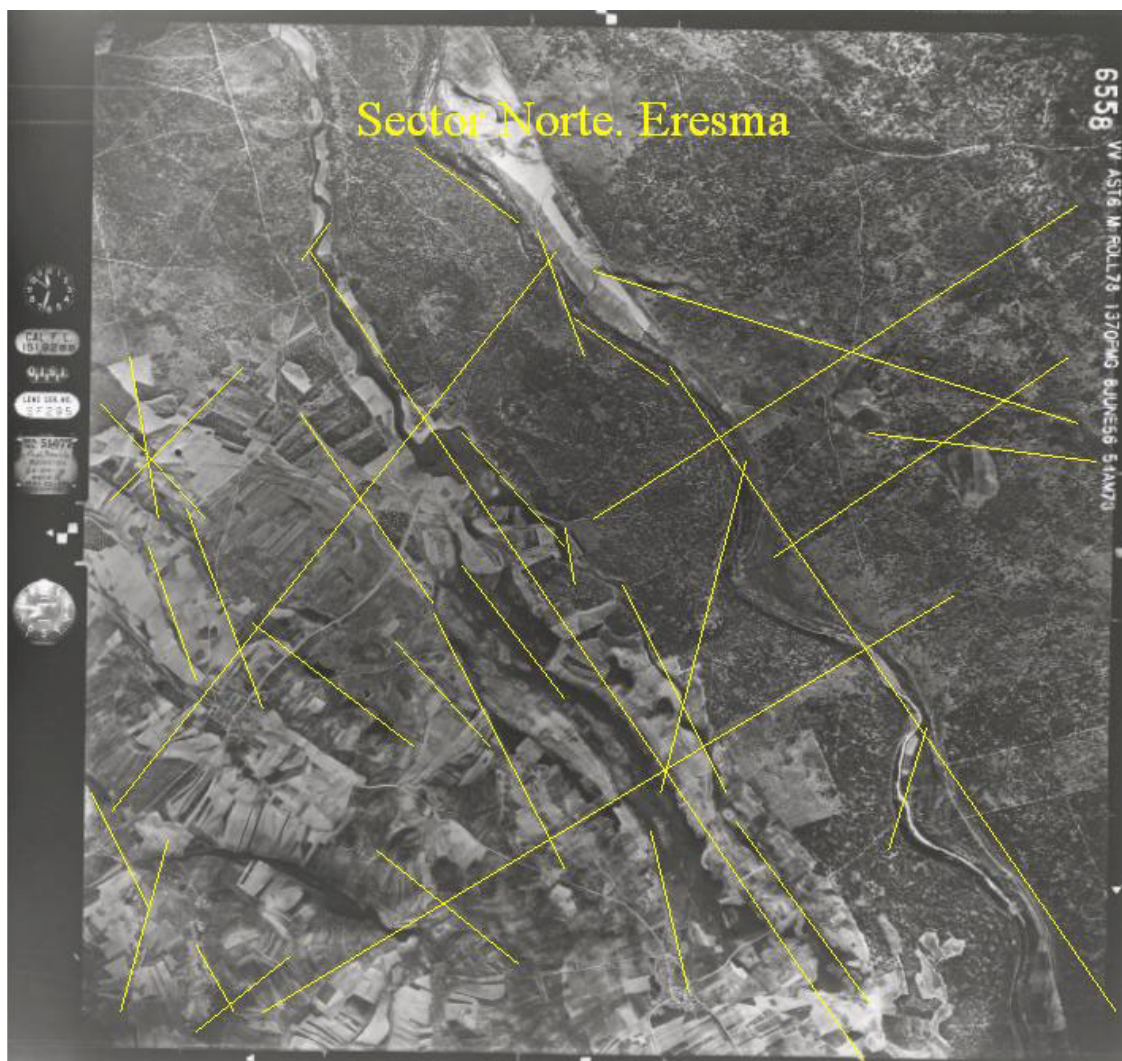


Fig. 9. Orientación en planta de las principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre los fotogramas del "vuelo americano" de 195, a escala 1:33.000. Sector norte. Escala aproximada 1:45.000.

La misma técnica ha sido empleada con los mismos fotogramas obtenidos del vuelo del SGE-IRYDA de 1977, a escala 1:22.000.

Se han seleccionado estas dos fotografías por presentar dos zonas de rezume detectadas en la zona de estudio, con descarga directa del acuífero superior hacia el río Eresma a través del manantial de Villeguillo, y del Voltoya a través de los manantiales del Lavadero, la Fuente Fría y la Fuente del Batán.

Esta elección se ha realizado atendiendo al criterio de que los manantiales de las terrazas del Eresma y Voltoya contribuyen al drenaje del acuífero, por tanto, resulta procedente estudiar la posible influencia tectónica en el funcionamiento de estos manantiales. Esta idea se apoya en las observaciones hidrogeológicas realizadas y presentadas en el Apartado 7.2 del bloque.

En el apartado mencionado y en las figuras adjuntas se aprecian indicios que soportan la hipótesis del funcionamiento de estos resúmenes relacionados con lineamientos de origen tectónico, en general de orientación NE-SO, en las que se han

encajado, al menos, dos drenes de drenaje del acuífero. Se aprecian además terrazas aluviales orientadas en dirección NNO-SSE.

De todas las figuras visionadas, se han seleccionado tres, en las que se presenta la orientación en planta de los principales lineamientos y accidentes tectónicos sobre los fotogramas del SGE de 1977, a escala 1:22.000 (Figs. 10 a 12).

Los sectores elegidos son similares en tres casos a los del vuelo previo de 1957, con objeto de detectar los rasgos evolutivos más relevantes. Estos son: sectores sur (manantiales del Lavadero y del Batán), y central (sector oriental en Prado Cerrado, que es la zona donde confluyen los ríos Voltoya y Eresma); y sector occidental (donde se han formado los principales humedales como la Laguna de la Iglesia y la Laguna de las Eras).

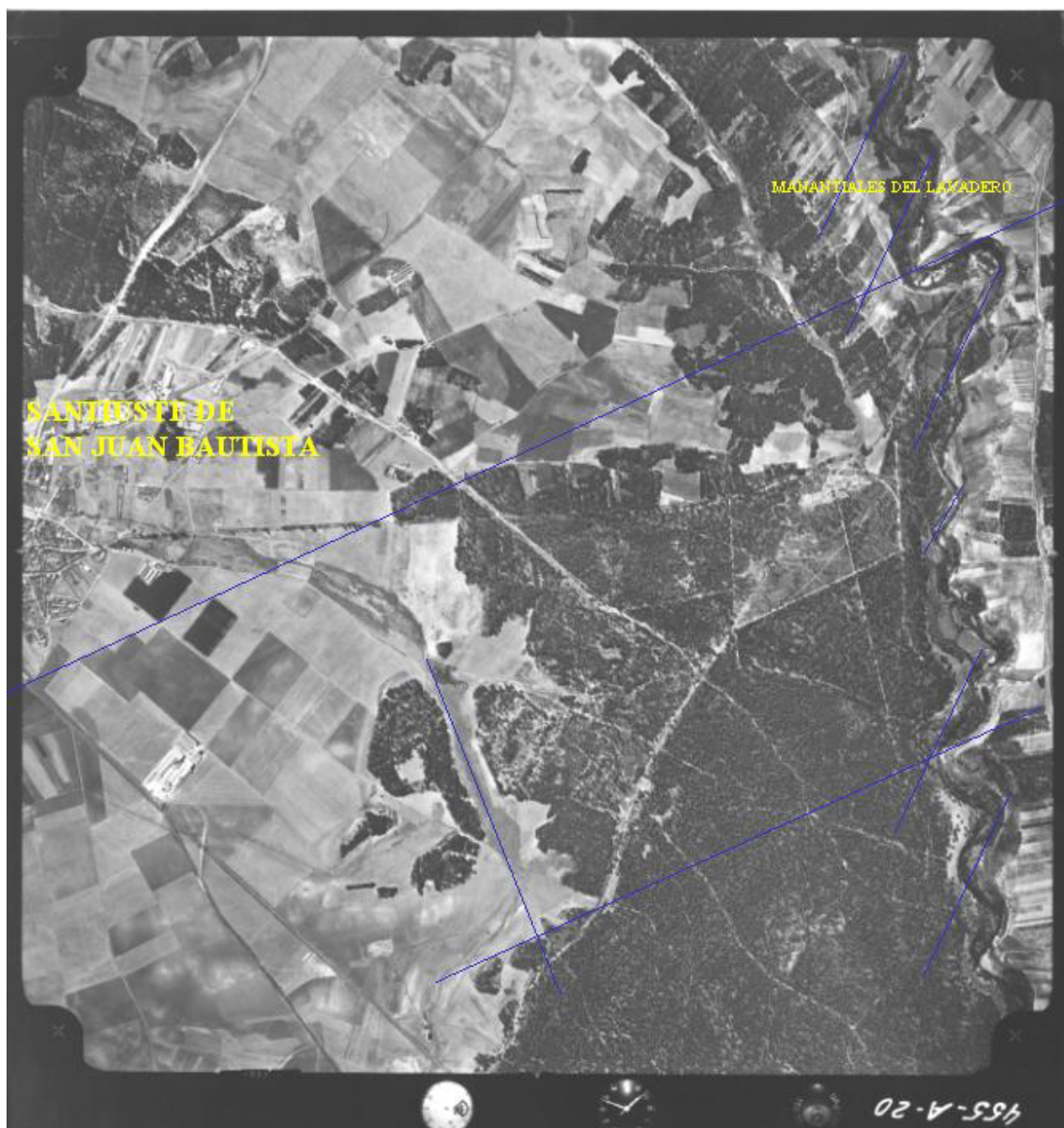


Fig. 10. Fotograma del vuelo el año 1977, que corresponde a la pasada A número de fotograma 18, de la hoja 455, del Servicio Geográfico del Ejército. Manantiales del Lavadero. Escala aproximada de la figura 1:25.000.

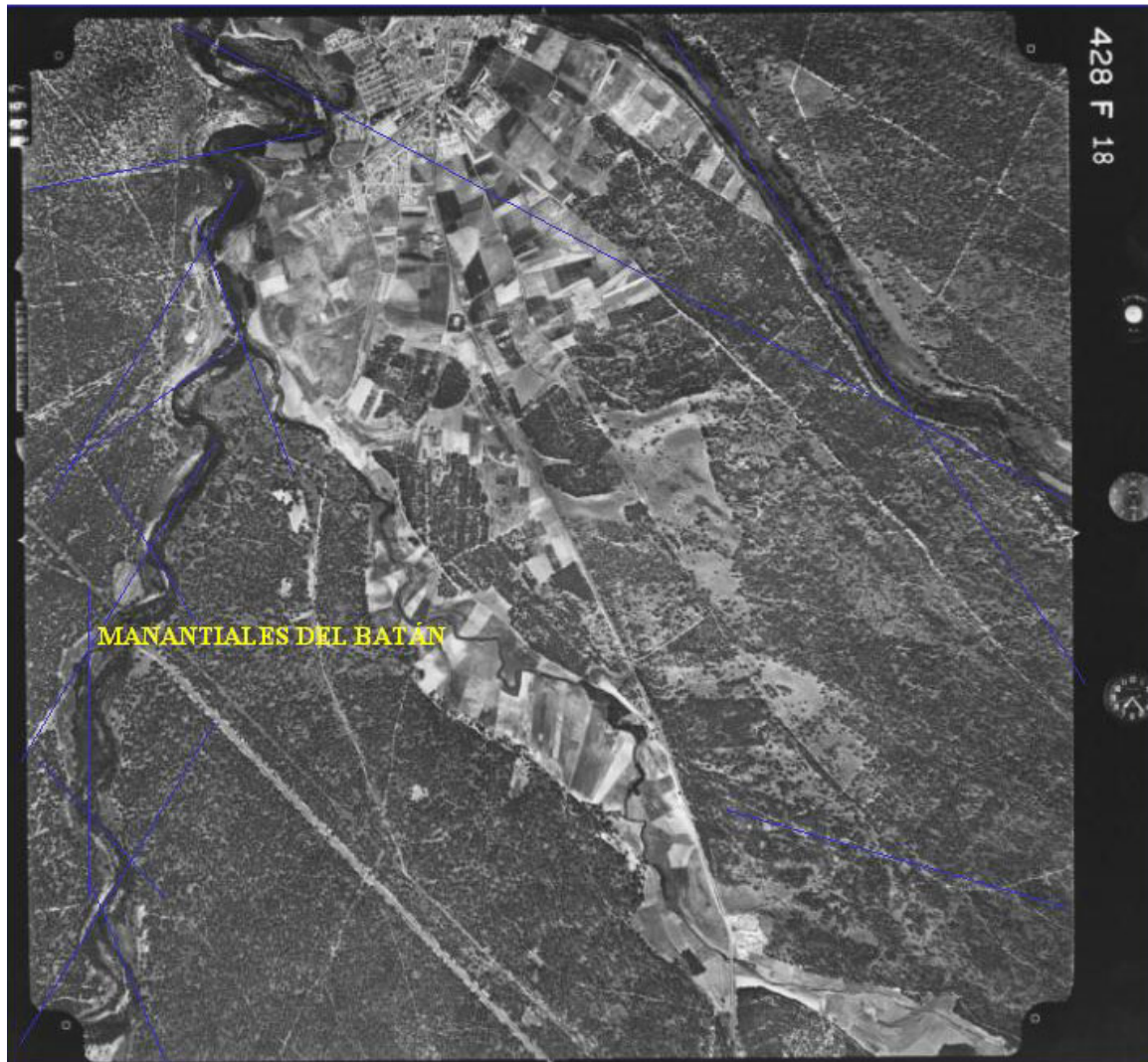


Fig. 11. Fotograma del vuelo el año 1977, que corresponde a la pasada A número de fotograma 18, de la hoja 455, del Servicio Geográfico del Ejército. Sector Norte. Manantiales del Batán, Río Voltoya. Escala aproximada de la figura 1:30.000. La población localizada al norte es Coca.

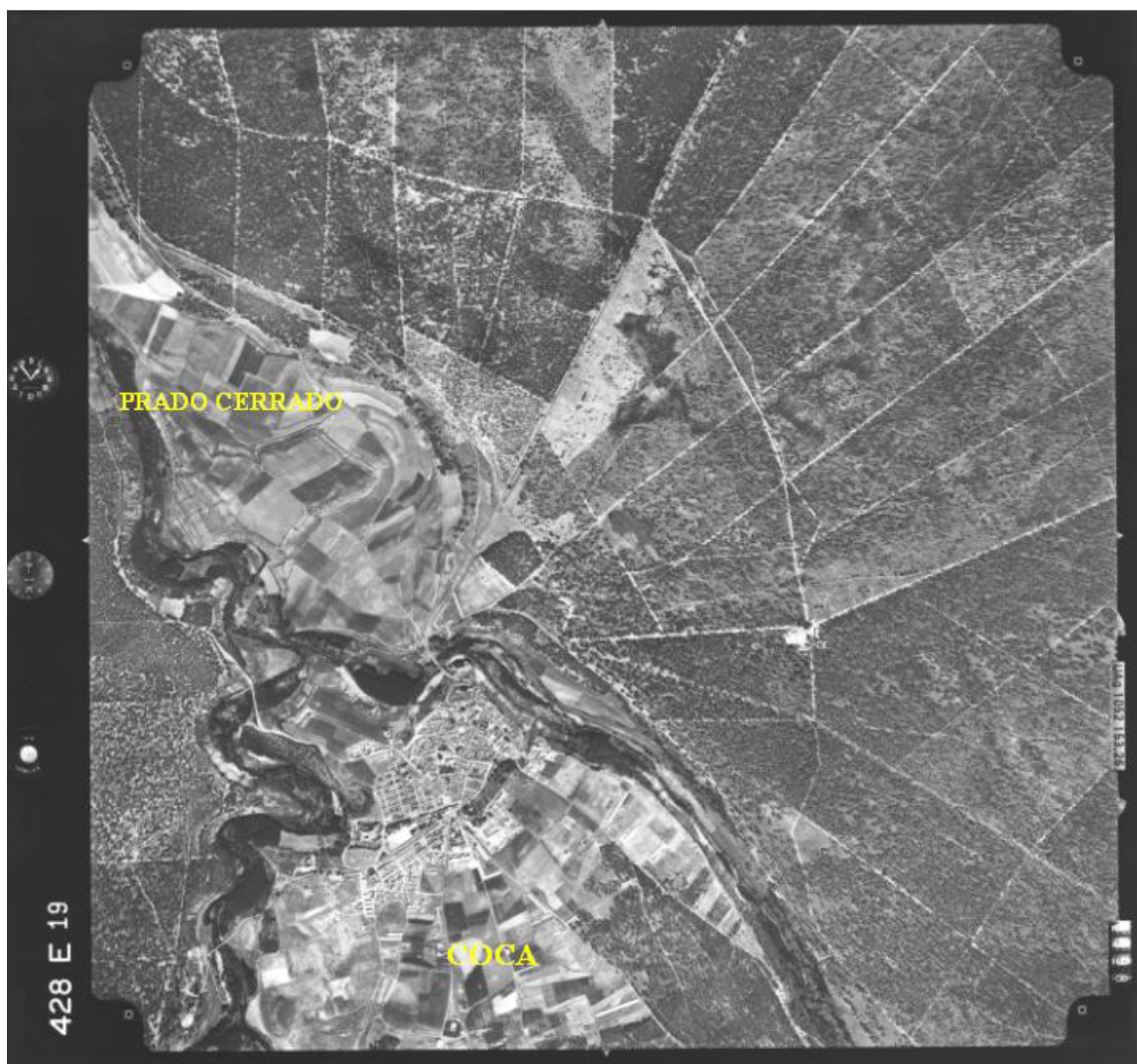


Fig. 12. Fotograma del vuelo el año 1977, que corresponde a la pasada A número de fotograma 18, de la hoja 455, del Servicio Geográfico del Ejército. Zona de Prado Cerrado (confluencia de los ríos Eresma y Voltoya), al norte de Coca.. Escala aproximada de la figura: 1: 30.000.

Para completar la serie, se han interpretado los lineamientos en los mismos sectores empleando la ortoimagen digital a color del vuelo de la JCL del año 2000, a escala 1:15.000.

En las siguientes figuras se presentan los fotogramas con los lineamientos interpretados para la zona situada al noreste de Santiuste, sector sur (río Voltoya), y sector norte (río Eresma) (Figs. 13 y 14).

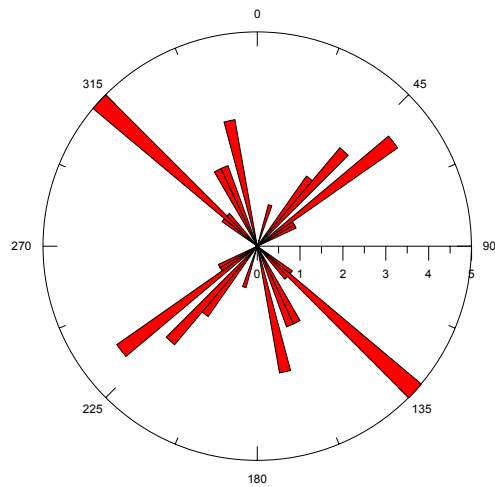


Fig. 13. Orientación en planta de las principales lineamientos y accidentes tectónicos interpretados sobre los fotogramas del vuelo de la JCL del año 2000, a escala 1:15.000. Sector sur. Escala aproximada de la figura 1:25.000.

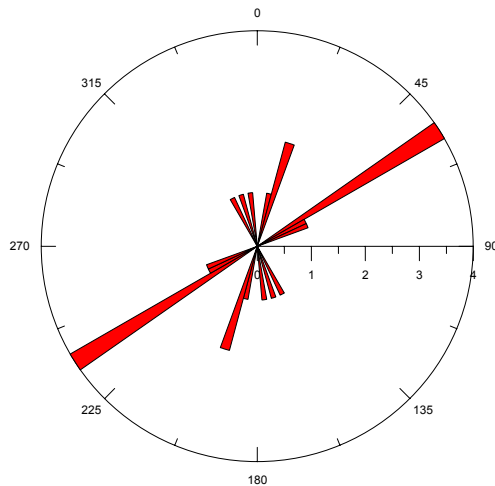


Fig. 14. Orientación en planta de las principales lineamientos y accidentes tectónicos interpretados sobre los fotogramas del vuelo de la JCL del año 2000, a escala 1:15.000. Sector norte. Escala aproximada de la figura 1:25.000.

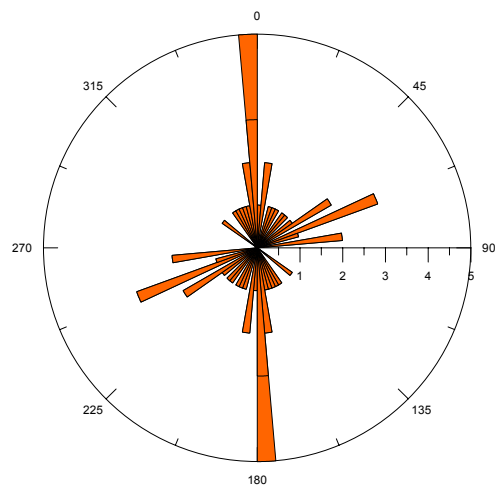
Tras medir la orientación de los lineamientos, se ha realizado un nuevo tratamiento estadístico con ellos, representando los resultados en rosas de fracturación (Figs. 15 a-c):



Vuelo americano, 1957.



Vuelo IRYDA, 1977.



Vuelo JCL, 2000.

Fig. 15. a-c. Rosas de fracturación representadas a partir de los lineamientos interpretados a escala local sobre fotogramas aéreos seriados.

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ORTOIMÁGENES						MDT				FOTOS AÉREAS				DERIVADA DIRECCIONAL									
ort 1991		spot 2000		landsat 2002		mdt alta		mdt media		vuelo americano				iryda		iryda		orto 2000		orto 2000		PENDIENTE	
ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no	ne	no		
20	326	20	326	20	326	38	46	63	25	Norte		Norte	Sur	Norte		Norte		Norte		Norte		2	
2	325	2	325	2	325	51	44	60	23	57	74	57	75	59	19	59	341	7	52	7	308	20	
54	330	54	330	54	330	45	49	55	11	39	81	39	69	68	6	68	354	4	3	4	357	45	
45	330	45	330	45	330	53	47		22	43	54	43	70	Sur		Sur			2		358	15	
40	305	40	305	40	305	55	47		52	59	18	59	58	14	29	14	331		1		359	42	
38	305	38	305	38	305	18	45			58	57	58	26	61		61		Sur		Sur		2	
	305	1	305	1	305	44	28			16	32	16	14	19		19		7	9	7	351	18	
	351	9	351	9	351	42	11			14	19	14	88	18		18		82	15	82	345	18	
	359	54	359	54	359	40	12			17	22	17	47	57		57		69	9	69	351	22	
	359	48	359	48	359					50	32	50	31	60		57		68	14	68	346	13	
	314	48	314	48	314					37	26	37	15	57		57		42	26	42	334	12	
	334	44	334	44	334						44	237	37	57				58	21	58	339	26	
	334		334	4	334						8	219	22					71	32	71	328	21	
	328		328	24	328						44	223	23					66		66		22	
	325		325	28	325						13	239	82					54		54		192	
	314		314	86	314						51	238	73					82		82		206	
	328		328	93	328						23	196	24					38		38		201	
	318		318	1	318						52	194	22					56		56		202	
	336		336	26	336						11	197	58					28		28		182	
	338		338	14	338						37	230	22					23		23		200	
	345		345	19	345						38	217	29					20		20		225	
	344		344	56	344						20	106	36									225	
	326		342	54	342						26	99	66									195	
	325		348		348						37	126	6									222	
	330		357		357						32	162	2									182	
	334		315		315						37	123	69									198	
	326		326		326						32	148	69									347	
	325		312		312					Sur		161	69									360	
	330		335		335					75	29	158	255									347	
	334		326		333					69	4	148	249									360	
			325		338					70	84	154	250									355	
			330		336					58	7	136	238									347	
			334		348					26	6	172	206									342	
			326		332					14	23	136	194									338	
			325		338					88	85	167	268									347	
			315		336					47	21	129	227									348	
			335		308					31	27	157	211									334	
			315		300					15	23	128	195									339	
					348					37	18	169	217									338	
					327					22	10	143	202									360	
					333					23	5	142	203									360	
					333					82	28	160	262									360	
					334					73	39	154	253									347	
					328					24		143	204									360	
					335					22		148	202									347	
					326					58		286	238									360	
					325					22		279	202										
					330					29		306	209										
					334					36		342	216										
					326					66		303	246										
					325					6		328	186										
					315					2		341	182										
					335					69		338	249										
					315					70		328	249										
					328					69		334	249										
												316	331										
												352	356										
												316	276										
												347	353										
												309	354										
												337	337										
												308	275										
												349	339										
												323	333										
												322	337										
												340	342										
												334	350										
												323	355										
												328	332										
													321										

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.2. PROSPECCIÓN. DATOS DIRECTOS E INDIRECTOS OBTENIDOS DE PERFORACIONES Y CAMPAÑAS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA



CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

nº	X	Y	Z	E EÓLICO	m.s.n.m. EOL	E EO+FLUV	m.s.n.m. FLU	E TERCIARIO	m.s.n.m. TERC	esp-eol	esp fluv	Observaciones
1	369050	4557400	800,0	0	800,0	0	800,0	0	800,0	0	0,0	
2	369450	4557400	795,0	0,5	794,5	3,5	791,5	3,5	791,5	0,5	3,0	
3	369800	4557400	797,0	0,7	796,3	1,4	795,6	1,4	795,6	0,7	0,7	
4	370150	4557400	798,0	7,2	790,8	7,5	790,5	7,5	790,5	7,2	0,3	
5	370650	4557400	800,0	20	780,0	22,8	777,2	22,8	777,2	20	2,8	Lentejón de baja resistividad (arcillas) entre 1.3 y 1.6 m.
6	368750	4558300	790,0	0	790,0	0	790,0	0	790,0	0	0,0	
7	369200	4558300	790,0	0	790,0	2,8	787,2	2,8	787,2	0	2,8	
8	369500	4558400	790,0	12,5	777,5	12,5	777,5	12,5	777,5	12,5	0,0	Arcillas superficiales entre 0 y 0.6 m
9	370075	4558250	790,0	2,5	787,5	2,5	787,5	2,5	787,5	2,5	0,0	Veta "arcillosa" entre 1.4 y 1.6 m
10	369700	4560600	785,0	2,8	782,2	2,8	782,2	2,8	782,2	2,8	0,0	
11	368800	4559000	792,0	0	792,0	0	792,0	0	792,0	0	0,0	
12	369100	4559025	790,0	0	790,0	3,8	786,2	3,8	786,2	0	3,8	Lentejón arcilloso entre 0 y 1 m (o arenas transmisivas).
13	369450	4559025	790,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Lentejón arcilloso entre 0 y 0.7 m. (o arenas transmisivas).
14	369900	4559025	790,0	5,4	784,6	5,4	784,6	5,4	784,6	5,4	0,0	
15	370100	4560650	790,0	1,5	788,5	1,5	788,5	1,5	788,5	1,5	0,0	
16	368350	4560025	795,0	0	795,0	0	795,0	0	795,0	0	0,0	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa.
17	368850	4560125	787,0	0,5	786,5	5,2	781,8	5,2	781,8	0,5	4,7	Lentejón arcilloso entre 0 y 1.9 m. (o arenas transmisivas).
18	369250	4560125	787,0	0,6	786,4	5,2	781,8	5,2	781,8	0,6	4,6	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa entre 0 y 1.1 m.
19	369825	4560025	790,0	0,5	789,5	2,1	787,9	2,1	787,9	0,5	1,6	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa entre 0 y 2.1 m.
20	370525	4560650	790,0	17,7	772,3	17,7	772,3	17,7	772,3	17,7	0,0	Veta "arcillosa" entre 5.6 y 8.2 m
21	368900	4560950	785,0	0,8	784,2	7,2	777,8	7,2	777,8	0,8	6,4	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0 a 0.8 m.
22	369200	4560900	785,0	1,8	783,2	n/a	n/a	n/a	783,2	1,8	n/a	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0 a 1.8 m.
23	369700	4560950	785,0	2,8	782,2	2,8	782,2	2,8	782,2	2,8	0,0	
24	370225	4560900	787,0	1,1	785,9	3,7	783,3	3,7	783,3	1,1	2,6	
25	370600	4560900	790,0	6,9	783,1	n/a	n/a	n/a	n/a	6,9	n/a	
26	369000	4561900	780,0	0,2	779,8	24,9	755,1	24,9	755,1	0,2	24,7	Valores geoelectricos característicos de una veta o alternancia arcillo-arenosa de 0.2 a 2.8 m.
27	369350	4561900	780,0	0,4	779,6	57,3	722,7	57,3	722,7	0,4	56,9	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0.4 a 1.4 m.
28	369725	4561900	780,0	0,5	779,5	5,8	774,2	5,8	774,2	0,5	5,3	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0.5 a 2.6 m.
29	370175	4561800	780,0	3,8	776,2	3,8	776,2	3,8	776,2	3,8	0,0	
30	370625	4561900	780,0	7,1	772,9	n/a	n/a	n/a	n/a	7,1	n/a	
31	368350	4562675	790,0	0	790,0	0	790,0	0	790,0	0	0,0	
32	368750	4562675	790,0	0	790,0	0,5	789,5	0,5	789,5	0	0,5	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillosa-aluvión de 0 a 0.8 m.
33	369200	4562650	780,0	0	780,0	38,6	741,4	38,6	741,4	0	38,6	
34	369525	4562800	780,0	13,7	766,3	37,7	742,3	37,7	742,3	13,7	24,0	
35	370000	4562650	780,0	6,5	773,5	6,5	773,5	6,5	773,5	6,5	0,0	
36	370325	4562675	780,0	4,8	775,2	4,8	775,2	4,8	775,2	4,8	0,0	
37	371150	4562675	780,0	11,9	768,1	11,9	768,1	11,9	768,1	11,9	0,0	
38	368950	4563325	785,0	0,4	784,6	0,4	784,6	0,4	784,6	0,4	0,0	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0 a 0.8 m.
39	369575	4563250	780,0	3	777,0	n/a	n/a	n/a	n/a	3	n/a	
40	369950	4563200	780,0	0,7	779,3	3,8	776,2	3,8	776,2	0,7	3,1	
41	370375	4563250	780,0	1,3	778,7	10,7	769,3	10,7	769,3	1,3	9,4	Vetas "arcillosas" entre 0.4 y 0.9 y entre 1.3 y 3.4 m
42	370750	4563250	778,0	1,3	776,7	25,7	752,3	25,7	752,3	1,3	24,4	Veta "arcillosa" entre 12.8 y 15.2 m
43	371050	4563250	778,0	3,9	774,1	3,9	774,1	3,9	774,1	3,9	0,0	
44	369125	4564000	780,0	3	777,0	24,7	755,3	24,7	755,3	3	21,7	Lentejón arcilloso entre 0 y 1.3 m. (o arenas transmisivas).
45	369500	4564075	780,0	2,6	777,4	2,6	777,4	2,6	777,4	2,6	0,0	
46	369800	4564000	780,0	9,5	770,5	9,5	770,5	9,5	770,5	9,5	0,0	
47	370075	4563975	780,0	2,4	777,6	2,4	777,6	2,4	777,6	2,4	0,0	
48	370450	4563950	780,0	14,6	765,4	14,6	765,4	14,6	765,4	14,6	0,0	Veta "arcillosa" entre 7.3 y 8.2 m
49	370825	4564000	780,0	3	777,0	3	777,0	3	777,0	3	0,0	
51	368850	4564650	780,0	26,8	753,2	26,8	753,2	26,8	753,2	26,8	0,0	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0 a 2.1 m.
52	369200	4564675	780,0	6,8	773,2	14,1	765,9	14,1	765,9	6,8	7,3	
53	369500	4564675	780,0	6,3	773,7	26,2	753,8	26,2	753,8	6,3	19,9	
54	369850	4564650	780,0	14,2	765,8	14,2	765,8	14,2	765,8	14,2	0,0	Veta "arcillosa" entre 3 y 9.8 m
55	370250	4564675	780,0	20	760,0	21,1	758,9	21,1	758,9	20	1,1	
56	370700	4564650	780,0	10,6	769,4	10,6	769,4	10,6	769,4	10,6	0,0	
58	368250	4565650	785,0	0,2	784,8	0,2	784,8	0,2	784,8	0,2	0,0	
59	368700	4565650	778,0	15,5	762,5	n/a	n/a	n/a	n/a	15,5	n/a	
60	369100	4565650	778,0	2,5	775,5	11,6	766,4	11,6	766,4	2,5	9,1	Valores geoelectricos característicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0.5 a 1.1 m.
61	369500	4565650	776,0	7,3	768,7	30	746,0	30	746,0	7,3	22,7	

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

62	369925	4565650	774,0	11,2	762,8	15	759,0	15	759,0	11,2	3,8	
nº	X	Y	Z	E EÓLICO	m.s.n.m. EOL	E EO+FLUV	m.s.n.m. FLU	E Terciario	m.s.n.m. TERC	esp-eol	esp fluv	Observaciones
63	370350	4565650	772,0	5,9	766,1	5,9	766,1	5,9	766,1	5,9	0,0	
64	370725	4565650	772,0	5	767,0	10	762,0	10	762,0	5	5,0	
65	368150	4566600	776,0	2,4	773,6	14,4	761,6	14,4	761,6	2,4	12,0	
67	368500	4566600	772,0	28,3	743,7	31,1	740,9	31,1	740,9	28,3	2,8	
68	369000	4566600	770,0	0,8	769,2	20	750,0	20	750,0	0,8	19,2	Valores geoelectricos caracteristicos de una alternancia arcillo-arenosa de 0.8 a 8.1 m.
69	369350	4566600	770,0	8,7	761,3	8,7	761,3	8,7	761,3	8,7	0,0	Veta "arcillosa" entre 0 y 1.3 m
70	369650	4566600	770,0	21,6	748,4	21,6	748,4	21,6	748,4	21,6	0,0	
71	369950	4566600	770,0	5,9	764,1	10,8	759,2	10,8	759,2	5,9	4,9	
72	370200	4566600	770,0	1,8	768,2	5,6	764,4	5,6	764,4	1,8	3,8	
73	368150	4567275	772,0	15,6	756,4	15,6	756,4	15,6	756,4	15,6	0,0	
74	368450	4567275	770,0	8,1	761,9	8,1	761,9	8,1	761,9	8,1	0,0	
75	368750	4567300	770,0	9,1	760,9	9,1	760,9	9,1	760,9	9,1	0,0	
76	369225	4567250	770,0	12,9	757,1	12,9	757,1	12,9	757,1	12,9	0,0	
77	369600	4567250	770,0	2,6	767,4	3	767,0	3	767,0	2,6	0,4	Puntos no alineados a la curva de campo. Discontinuidad litológica o estructural.
78	370000	4567250	770,0	2	768,0	6,3	763,7	6,3	763,7	2	4,3	
79	368175	4568075	770,0	14,2	755,8	23,2	746,8	23,2	746,8	14,2	9,0	
80	368575	4568050	770,0	8,9	761,1	n/a	n/a	n/a	n/a	8,9	n/a	Valores geoelectricos caracteristicos de una alternancia arcillo-arenosa entre 8.9 y 41.6 m.
81	368950	4568050	770,0	12,5	757,5	15,1	754,9	15,1	754,9	12,5	2,6	
82	369300	4568050	770,0	3,5	766,5	5	765,0	5	765,0	3,5	1,5	
83	369650	4568050	770,0	3,8	766,2	3,8	766,2	3,8	766,2	3,8	0,0	
84	369950	4568050	768,0	4	764,0	4	764,0	4	764,0	4	0,0	
85	367350	4568000	770,0	20	750,0	26,9	743,1	26,9	743,1	20	6,9	
86	367675	4567275	778,0	0,5	777,5	n/a	n/a	n/a	n/a	0,5	n/a	
87	367850	4566650	780,0	1,9	778,1	n/a	n/a	1,9	n/a	1,9	n/a	
1	369251	4555107	829,9	0	829,9	0	829,9	0	829,9	0	0,0	
2	369530	4555207	830,1	0	830,1	0	830,1	0	830,1	0	0,0	
3	370168	4555447	842,6	0	842,6	0	842,6	0	842,6	0	0,0	
4	370973	4555041	809,2	2	807,2	n/a	n/a	n/a	n/a	2	n/a	
5	371476	4555157	807,3	0	807,3	0	807,3	0	807,3	0	0,0	
6	370500	4555780	806,8	0	806,8	1,3	805,5	1,3	805,5	0	1,3	
7	371053	4555790	808,3	1,5	806,8	2,8	805,5	2,8	805,5	1,5	1,3	
8	370019	4555842	824,9	0,5	824,4	1,5	823,4	1,5	823,4	0,5	1,0	
9	369295	4555916	820,0	0	820,0	0	820,0	0	820,0	0	0,0	
10	369557	4556779	805,7	0	805,7	0	805,7	0	805,7	0	0,0	
11	369923	4556327	805,5	0	805,5	0	805,5	0	805,5	0	0,0	
12	370320	4556619	803,9	11,8	792,1	40	763,9	40	763,9	11,8	28,2	
13	370831	4556885	800,2	2,3	797,9	5,4	794,8	5,4	794,8	2,3	3,1	
14	370068	4557281	800,5	3,8	796,7	13,5	787,0	13,5	787,0	3,8	9,7	
15	369644	4557851	801,0	7,7	793,3	7,7	793,3	7,7	793,3	7,7	0,0	Veta "arcillosa" de 0 a 1.9 m
16	369979	4557770	800,6	3,5	797,1	11	789,6	11	789,6	3,5	7,5	Veta "arcillosa" entre 1.7 y 3.5 m
17	370571	4558055	799,0	1,3	797,7	14,1	784,9	14,1	784,9	1,3	12,8	Veta "arcillosa" entre 3.7 y 4.9 m
18	370856	4558112	799,0	2,4	796,6	8,6	790,4	8,6	790,4	2,4	6,2	
19	370298	4558494	808,7	6,1	802,6	23,9	784,8	23,9	784,8	6,1	17,8	
20	370989	4558618	798,4	0	798,4	0	798,4	0	798,4	0	0,0	
21	370505	4559209	796,6	0	796,6	2,3	794,3	2,3	794,3	0	2,3	
22	369562	4559122	795,8	10,3	785,5	10,3	785,5	10,3	785,5	10,3	0,0	
23	369671	4561398	791,0	0	791,0	2,5	788,5	2,5	788,5	0	2,5	
24	369109	4561327	792,4	5,9	786,5	16,6	775,8	16,6	775,8	5,9	10,7	Veta "arcillosa" de 0 a 1.2 m
25	369585	4562914	783,8	1,3	782,5	11,5	772,3	11,5	772,3	1,3	10,2	Veta "arcillosa" entre 1.3 y 2.9 m
26	369566	4563531	782,8	1,7	781,1	7,8	775,0	7,8	775,0	1,7	6,1	Veta "arcillosa" entre 1.7 y 2.2 m
27	369804	4567124	775,8	0,7	775,1	7,5	768,3	7,5	768,3	0,7	6,8	Veta "arcillosa" entre 0.7 y 2.6 m
28	367858	4568518	768,5	12,4	756,1	12,4	756,1	12,4	756,1	12,4	0,0	Veta "arcillosa" de 0 a 2.1 m
29	367853	4568646	768,3	8,7	759,6	15,9	752,4	15,9	752,4	8,7	7,2	Veta "arcillosa" de 0 a 2.2 m
30	368401	4568530	769,4	4,5	764,9	4,5	764,9	4,5	764,9	4,5	0,0	Veta "arcillosa" de 0 a 1.5 m
31	368763	4568845	768,2	1,3	766,9	1,3	766,9	1,3	766,9	1,3	0,0	
32	369467	4569064	768,5	0,9	767,6	0,9	767,6	0,9	767,6	0,9	0,0	
33	368015	4568967	766,8	0	766,8	8,7	758,1	8,7	758,1	0	8,7	
34	368380	4569008	767,9	2	765,9	2	765,9	2	765,9	2	0,0	

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

35	367490	4569351	766,8	9,5	757,3	42,9	723,9	42,9	723,9	9,5	33,4	
36	367196	4569782	765,5	3,9	761,6	13,8	751,7	13,8	751,7	3,9	9,9	
nº	X	Y	Z	E EÓLICO	m.s.n.m. EOL	E EO+FLUV	m.s.n.m. FLU	E TERCIARIO	m.s.n.m. TERC	esp-eol	esp fluv	Observaciones
37	367403	4570168	764,8	n/a	763,6	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Veta "arcillosa" entre 1.2 y 3.9 m
38	368075	4569858	764,8	1,5	763,3	1,5	763,3	1,5	763,3	1,5	0,0	
39	368654	4570019	766,6	3,2	763,4	19,8	746,8	19,8	746,8	3,2	16,6	
40	368978	4569755	766,6	2,6	764,0	7,2	759,4	7,2	759,4	2,6	4,6	
41	368091	4570706	765,1	0,8	764,3	0,8	764,3	0,8	764,3	0,8	0,0	
42	367429	4570790	761,7	0,7	761,0	0,7	761,0	0,7	761,0	0,7	0,0	
43	366788	4570634	762,8	2,9	759,9	22,1	740,7	22,1	740,7	2,9	19,2	
44	366280	4570727	761,3	1	760,3	5	756,3	5	756,3	1	4,0	
45	366035	4571560	758,3	1,5	756,8	20,3	738,0	20,3	738,0	1,5	18,8	Veta "arcillosa" entre 1.5 y 3.7 m
46	366656	4571797	763,9	1,8	762,1	6,4	757,5	6,4	757,5	1,8	4,6	
47	367507	4571445	758,6	1,4	757,2	7,1	751,5	7,1	751,5	1,4	5,7	
48	367961	4571657	764,0	2,2	761,8	2,2	761,8	2,2	761,8	2,2	0,0	
49	368935	4567724	772,7	4,5	768,2	16,4	756,3	16,4	756,3	4,5	11,9	
50	370049	4568028	773,3	3,7	769,6	3,7	769,6	3,7	769,6	3,7	0,0	
51	368640	4565349	777,5	15,4	762,1	15,4	762,1	15,4	762,1	15,4	0,0	Veta "arcillosa" de 0 a 1.6 y alternancia arcillo-arenosa desde 1.6 m
52	368938	4565432	776,7	0	776,7	1,5	775,2	1,5	775,2	0	1,5	
53	369154	4565490	777,4	1,1	776,3	10,5	766,9	10,5	766,9	1,1	9,4	Veta "arcillosa" entre 1.1 y 2.9 m
54	369412	4563972	780,5	2,3	778,2	2,3	778,2	2,3	778,2	2,3	0,0	
55	369076	4563785	782,1	1,8	780,3	26,5	755,6	26,5	755,6	1,8	24,7	
56	369166	4563132	785,1	0	785,1	3,9	781,2	3,9	781,2	0	3,9	
57	369221	4562727	784,8	0	784,8	9,6	775,2	9,6	775,2	0	9,6	
58	369882	4561691	789,2	2,9	786,3	2,9	786,3	2,9	786,3	2,9	0,0	
59	368602	4566509	773,4	5,3	768,1	22,5	750,9	22,5	750,9	5,3	17,2	Veta "arcillosa" de 0 a 0.9 m
60	369660	4562080	787,2	5,5	781,7	19,6	767,6	19,6	767,6	5,5	14,1	Veta "arcillosa" entre 1.2 y 2.5 m
40	367666	4568430	769	2	767	5	764	5	764	2	3,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
47	367601	4567695	771	16	755	23	748	23	748	16	7,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
49	369163	4567640	775	16	759	16	759	16	759	16	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
52	369527	4567430	770	0	770	0	770	0	770	0	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
53	367914	4567270	770	16	754	16	754	16	754	16	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
55	369753	4567100	772	4	768	4	768	4	768	4	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
106	369227	4561430	787	20	767	29	758	29	758	20	9,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
153	368631	4559366	797	5	792	8	789	8	789	5	3,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
169	369549	4558792	795	19	776	19	776	19	776	19	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
202	367833	4557080	825	0	825	0	825	0	825	0	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
227	371322	4554656	809	0,5	808,5	0,5	808,5	0,5	808,5	0,5	0,0	Sondeo inventariado en la fase de campo.
S-1	368074,3	4568022,2	768,58	2,3	766,28	8,4	760,18	8,4	760,18	2,3	6,1	Piezómetro de observación.
S-2	368926,8	4565642,6	774,99	2,8	772,19	3,5	771,49	3,5	771,49	2,8	0,7	Piezómetro de observación.
S-3	369626,6	4563622,6	779,65	2,5	777,15	2,5	777,15	2,5	777,15	2,5	0,0	Piezómetro de observación.
S-4	369393,1	4561456,9	786,42	17,6	768,82	17,6	768,82	17,6	768,82	17,6	0,0	Piezómetro de observación.
S-5	369339,9	4558514,7	796,23	18	778,23	18	778,23	18	778,23	18	0,0	Piezómetro de observación.
S-6	370124,5	4556765,2	800,27	22,85	777,42	37,7	762,57	37,7	762,57	22,85	14,9	Piezómetro de observación.
SW-1	367419	4570177	763	13,2	749,8	31	741,4	31	733	13,2	17,8	Piezómetro de observación.
SW-3	369306	4566315	778,7	4	768,7	16,8	761,9	16,8	761,9	4	12,8	Piezómetro de observación.
SW-4	369787	4565325	780,9	10,6	771,75	15,65	765,25	15,65	765,25	10,6	5,1	Piezómetro de observación.
SW-6	370037	4564627	779,4	9,5	769,9	15,9	763,5	15,9	758,4	9,5	6,4	Piezómetro de observación.
SW-8	369475	4559082	798,3	16,7	781,6	19,2	779,1	19,2	779,1	16,7	2,5	Piezómetro de observación.
SW-9	369662	4560253	790,8	2,5	788,3	9	781,8	9	781,8	2,5	6,5	Piezómetro de observación.
SW-10	370474	4556999	803,8	29,4	774,4	29,4	774,4	30	773,8	29,4	0,6	Piezómetro de observación.
SW-11	370648	4560956	791,9	8,3	783,6	11,1	782,1	11,1	780,8	8,3	2,8	Piezómetro de observación.
SW-12	367529	4569305	766,2	11,2	726,2	41	726,2	41	726,2	11,2	29,8	Piezómetro de observación.
SW-2	368686	4567906	771,1	18,5	750,1	22	750,1	22	750,1	18,5	3,5	Piezómetro de observación.
SW-5	368958	4564189	782,0	11,9	770,1	11,9	770,1	11,9	770,1	11,9	0,0	Piezómetro de observación.
SW-7	369337	4562450	786,6	15,25	771,3	15,25	771,3	15,25	771,3	15,25	0,0	Piezómetro de observación.
SW-13	369979	4558559	798,3	0,7	780,0	18,3	780,0	18,3	780,0	0,7	17,6	Piezómetro de observación.
SW-15	370689	4561876	789,1	4,2	778,7	10,4	778,7	10,4	778,7	4,2	6,2	Piezómetro de observación.
SW-14	371224	4564445	782,2	4,5	777,2	5	777,2	5	777,2	4,5	0,5	Piezómetro de observación.
P-1	368629	4565382	778,1	15,5	762,6	15,5	762,6	15,5	762,6	15,5	0,0	sondeos percusion

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

P-2	369694	4563335	783,8	4,5	779,3	4,5	779,3	4,5	779,3	4,5	0,0	sondeos percusion
P-3	369655	4562513	785,2	2,5	779,7	5,5	779,7	5,5	779,7	2,5	3,0	sondeos percusion
P-4	369377	4560682	790,8	6,5	784,3	6,5	784,3	6,5	784,3	6,5	0,0	sondeos percusion
n°	X	Y	Z	E EÓLICO	m.s.n.m. EOL	E EO+FLUV	m.s.n.m. FLU	E TERCIARIO	m.s.n.m. TERC	esp-eol	esp fluv	Observaciones
P-5	370816	4561789	788,6	16	774,6	16	774,6	16	774,6	16	0,0	sondeos percusion
d.m.1	368265	4570689	752,3	0	752,3	0	752,3	0	752,3	0	0	contacto t-q
d.m.2	369289	4569665,9	740,1	0	740,1	0	740,1	0	740,1	0	0	contacto t-q
d.m.3	368963	4570364	761,0	0	761,0	0	761,0	0	761,0	0	0	contacto t-q
d.m.4	367474	4568735	768,8	0	768,8	0	768,8	0	768,8	0	0	contacto t-q
d.m.5	367474	4568409	770,6	0	770,6	0	770,6	0	770,6	0	0	contacto t-q
d.m.6	367613	4567618	773,4	0	773,4	0	773,4	0	773,4	0	0	contacto t-q
d.m.7	367753	4567338	776,2	0	776,2	0	776,2	0	776,2	0	0	contacto t-q
d.m.8	367939	4566594	784,6	0	784,6	0	784,6	0	784,6	0	0	contacto t-q
d.m.9	368265	4566314	781,2	0	781,2	0	781,2	0	781,2	0	0	contacto t-q
d.m.10	368498	4565570	778,4	0	778,4	0	778,4	0	778,4	0	0	contacto t-q
d.m.11	368684	4564872	780,6	0	780,6	0	780,6	0	780,6	0	0	contacto t-q
d.m.12	368870	4564034	783,0	0	783,0	0	783,0	0	783,0	0	0	contacto t-q
d.m.13	368870	4563522	790,9	0	790,9	0	790,9	0	790,9	0	0	contacto t-q
d.m.14	369103	4563150	787,2	0	787,2	0	787,2	0	787,2	0	0	contacto t-q
d.m.15	369103	4562777	787,4	0	787,4	0	787,4	0	787,4	0	0	contacto t-q
d.m.16	368637	4562079	794,5	0	794,5	0	794,5	0	794,5	0	0	contacto t-q
d.m.17	368730	4561846	797,4	0	797,4	0	797,4	0	797,4	0	0	contacto t-q
d.m.18	368963	4561660	805,3	0	805,3	0	805,3	0	805,3	0	0	contacto t-q
d.m.19	368823	4561474	795,1	0	795,1	0	795,1	0	795,1	0	0	contacto t-q
d.m.20	368777	4560822	799,5	0	799,5	0	799,5	0	799,5	0	0	contacto t-q
d.m.21	368823	4560497	793,4	0	793,4	0	793,4	0	793,4	0	0	contacto t-q
d.m.22	368312	4559659	802,6	0	802,6	0	802,6	0	802,6	0	0	contacto t-q
d.m.23	368358	4559193	803,7	0	803,7	0	803,7	0	803,7	0	0	contacto t-q
d.m.24	368823	4559147	803,8	0	803,8	0	803,8	0	803,8	0	0	contacto t-q
d.m.25	368591	4558449	802,9	0	802,9	0	802,9	0	802,9	0	0	contacto t-q
d.m.26	368544	4558076	803,3	0	803,3	0	803,3	0	803,3	0	0	contacto t-q
d.m.27	368637	4557471	811,2	0	811,2	0	811,2	0	811,2	0	0	contacto t-q
d.m.28	368730	4556820	810,9	0	810,9	0	810,9	0	810,9	0	0	contacto t-q
d.m.29	368963	4556261	816,6	0	816,6	0	816,6	0	816,6	0	0	contacto t-q
d.m.30	369103	4556680	831,1	0	831,1	0	831,1	0	831,1	0	0	contacto t-q
d.m.31	369196	4557052,9	809,0	0	809,0	0	809,0	0	809,0	0	0	contacto t-q
d.m.32	369335	4557052	805,2	0	805,2	0	805,2	0	805,2	0	0	contacto t-q
d.m.33	369522	4556680	809,9	0	809,9	0	809,9	0	809,9	0	0	contacto t-q
d.m.34	369708	4556541	806,4	0	806,4	0	806,4	0	806,4	0	0	contacto t-q
d.m.35	369661	4556122	817,5	0	817,5	0	817,5	0	817,5	0	0	contacto t-q
d.m.36	369941	4555889	818,0	0	818,0	0	818,0	0	818,0	0	0	contacto t-q
d.m.37	370080	4555796	829,2	0	829,2	0	829,2	0	829,2	0	0	contacto t-q
d.m.38	370359	4555703	814,2	0	814,2	0	814,2	0	814,2	0	0	contacto t-q
d.m.39	370546	4555423	812,1	0	812,1	0	812,1	0	812,1	0	0	contacto t-q
d.m.40	370592	4555191	814,9	0	814,9	0	814,9	0	814,9	0	0	contacto t-q
d.m.41	371151	4565477	763,9	0	763,9	0	763,9	0	763,9	0	0	contacto t-q
d.m.42	371244	4565244	748,4	0	748,4	0	748,4	0	748,4	0	0	contacto t-q
d.m.43	371290	4564965	744,7	0	744,7	0	744,7	0	744,7	0	0	contacto t-q
d.m.44	371569	4564406	763,8	0	763,8	0	763,8	0	763,8	0	0	contacto t-q
d.m.45	371569	4563568	771,1	0	771,1	0	771,1	0	771,1	0	0	contacto t-q
d.m.46	371709	4564034	773,8	0	773,8	0	773,8	0	773,8	0	0	contacto t-q
d.m.47	371476	4562638	771,0	0	771,0	0	771,0	0	771,0	0	0	contacto t-q
d.m.48	370034	4560264	792,7	0	792,7	0	792,7	0	792,7	0	0	contacto t-q
d.m.49	370173	4559985	796,0	0	796,0	0	796,0	0	796,0	0	0	contacto t-q
d.m.50	370313	4559333	796,7	0	796,7	0	796,7	0	796,7	0	0	contacto t-q
d.m.51	370452	4558961	798,4	0	798,4	0	798,4	0	798,4	0	0	contacto t-q
d.m.52	370499	4558588	799,9	0	799,9	0	799,9	0	799,9	0	0	contacto t-q
d.m.53	370592	4558356	798,7	0	798,7	0	798,7	0	798,7	0	0	contacto t-q
d.m.54	370639	4558216	798,7	0	798,7	0	798,7	0	798,7	0	0	contacto t-q
d.m.55	370313	4558263	809,6	0	809,6	0	809,6	0	809,6	0	0	contacto t-q
d.m.56	369894	4559705	801,1	0	801,1	0	801,1	0	801,1	0	0	contacto t-q
d.m.57	369987	4559287	806,4	0	806,4	0	806,4	0	806,4	0	0	contacto t-q
d.m.58	370034	4558961	801,9	0	801,9	0	801,9	0	801,9	0	0	contacto t-q
d.m.59	370080	4558635	800,7	0	800,7	0	800,7	0	800,7	0	0	contacto t-q
d.m.60	368265	4563289	797,4	0	797,4	0	797,4	0	797,4	0	0	contacto t-q
d.m.61	368358	4562591	792,4	0	792,4	0	792,4	0	792,4	0	0	contacto t-q
d.m.62	368218	4558356	807,3	0	807,3	0	807,3	0	807,3	0	0	contacto t-q
d.m.63	367427	4558914	815,0	0	815,0	0	815,0	0	815,0	0	0	contacto t-q

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

d.m.64	367381	4559426	813,5	0	813,5	0	813,5	0	813,5	0	0	contacto t-q
d.m.65	367334	4557611	826,4	0	826,4	0	826,4	0	826,4	0	0	contacto t-q
d.m.66	367381	4557052	836,6	0	836,6	0	836,6	0	836,6	0	0	contacto t-q
d.m.67	367427	4556587	834,9	0	834,9	0	834,9	0	834,9	0	0	contacto t-q
n°	X	Y	Z	E EÓLICO	m.s.n.m. EOL	E EO+FLUV	m.s.n.m. FLU	E TERCARIO	m.s.n.m. TERC	esp-eol	esp fluv	Observaciones
d.m.68	367567	4556122	837,6	0	837,6	0	837,6	0	837,6	0	0	contacto t-q
d.m.69	367800	4555517	843,6	0	843,6	0	843,6	0	843,6	0	0	contacto t-q
d.m.70	367241	4558123	822,2	0	822,2	0	822,2	0	822,2	0	0	contacto t-q
d.m.71	367195	4558635	823,0	0	823,0	0	823,0	0	823,0	0	0	contacto t-q
d.m.72	369754	4555470	837,2	0	837,2	0	837,2	0	837,2	0	0	contacto t-q
d.m.73	369335	4556075	828,6	0	828,6	0	828,6	0	828,6	0	0	contacto t-q
d.m.74	369149	4556401	828,3	0	828,3	0	828,3	0	828,3	0	0	contacto t-q
d.m.75	367334	4560078	815,1	0	815,1	0	815,1	0	815,1	0	0	contacto t-q
d.m.76	367613	4560590	815,4	0	815,4	0	815,4	0	815,4	0	0	contacto t-q
d.m.77	367474	4561288	815,2	0	815,2	0	815,2	0	815,2	0	0	contacto t-q
d.m.78	367288	4560450	816,2	0	816,2	0	816,2	0	816,2	0	0	contacto t-q
d.m.79	367660	4562126	805,7	0	805,7	0	805,7	0	805,7	0	0	contacto t-q
d.m.80	367939	4562498	804,0	0	804,0	0	804,0	0	804,0	0	0	contacto t-q
d.m.81	367660	4562684	804,8	0	804,8	0	804,8	0	804,8	0	0	contacto t-q
d.m.82	367567	4563010	805,8	0	805,8	0	805,8	0	805,8	0	0	contacto t-q
d.m.83	367567	4563243	801,3	0	801,3	0	801,3	0	801,3	0	0	contacto t-q
d.m.84	367381	4563568	800,8	0	800,8	0	800,8	0	800,8	0	0	contacto t-q
d.m.85	367334	4564080	801,0	0	801,0	0	801,0	0	801,0	0	0	contacto t-q
d.m.86	367101	4564406	801,1	0	801,1	0	801,1	0	801,1	0	0	contacto t-q
d.m.87	368544	4560124	797,6	0	797,6	0	797,6	0	797,6	0	0	contacto t-q
d.m.88	368823	4562451	787,6	0	787,6	0	787,6	0	787,6	0	0	contacto t-q
d.m.89	367055	4568176	785,6	0	785,6	0	785,6	0	785,6	0	0	contacto t-q
d.m.90	367288	4567664	783,5	0	783,5	0	783,5	0	783,5	0	0	contacto t-q
d.m.91	367474	4566966	787,5	0	787,5	0	787,5	0	787,5	0	0	contacto t-q
d.m.92	367939	4566175	785,3	0	785,3	0	785,3	0	785,3	0	0	contacto t-q
d.m.93	368172	4565709	789,5	0	789,5	0	789,5	0	789,5	0	0	contacto t-q
d.m.94	368358	4565011	789,6	0	789,6	0	789,6	0	789,6	0	0	contacto t-q
d.m.95	368637	4564546	785,3	0	785,3	0	785,3	0	785,3	0	0	contacto t-q
d.m.96	367148	4562870	805,6	0	805,6	0	805,6	0	805,6	0	0	contacto t-q
d.m.97	367101	4559985	823,7	0	823,7	0	823,7	0	823,7	0	0	contacto t-q
d.m.98	367055	4560915	819,5	0	819,5	0	819,5	0	819,5	0	0	contacto t-q
d.m.99	367148	4561614	815,2	0	815,2	0	815,2	0	815,2	0	0	contacto t-q
d.m.100	368498	4561800	804,3	0	804,3	0	804,3	0	804,3	0	0	contacto t-q
d.m.101	368544	4562451	789,0	0	789,0	0	789,0	0	789,0	0	0	contacto t-q
d.m.102	368451	4563522	794,8	0	794,8	0	794,8	0	794,8	0	0	contacto t-q
d.m.103	367474	4557844	825,1	0	825,1	0	825,1	0	825,1	0	0	contacto t-q
d.m.104	367800	4555098	847,1	0	847,1	0	847,1	0	847,1	0	0	contacto t-q
d.m.105	369289	4555470,5	825,8	0	825,8	0	825,8	0	825,8	0	0	contacto t-q
d.m.106	368963	4555935	823,0	0	823,0	0	823,0	0	823,0	0	0	contacto t-q
d.m.107	368730	4556447	822,4	0	822,4	0	822,4	0	822,4	0	0	contacto t-q
d.m.108	370174	4558456	801,9	0	801,9	0	801,9	0	801,9	0	0	contacto t-q
d.m.109	370235	4558566	807,1	0	807,1	0	807,1	0	807,1	0	0	contacto t-q
d.m.110	370320	4558441	808,7	0	808,7	0	808,7	0	808,7	0	0	contacto t-q
d.m.111	368688	4561970	794,6	0	794,6	0	794,6	0	794,6	0	0	contacto t-q
d.m.112	368949	4561850	793,6	0	793,6	0	793,6	0	793,6	0	0	contacto t-q
d.m.113	368939	4563782	783,3	0	783,3	0	783,3	0	783,3	0	0	contacto t-q
d.m.114	368735	4564620	781,1	0	781,1	0	781,1	0	781,1	0	0	contacto t-q
d.m.115	368543	4565311	779,5	0	779,5	0	779,5	0	779,5	0	0	contacto t-q
d.m.116	368087	4566512	778,5	0	778,5	0	778,5	0	778,5	0	0	contacto t-q
d.m.117	367694	4567522	773,4	0	773,4	0	773,4	0	773,4	0	0	contacto t-q
d.m.118	367416	4567872	773,1	0	773,1	0	773,1	0	773,1	0	0	contacto t-q
d.m.119	367433	4568192	770,4	0	770,4	0	770,4	0	770,4	0	0	contacto t-q
d.m.120	367416	4567846	773,3	0	773,3	0	773,3	0	773,3	0	0	contacto t-q
gps51	371578	4563303	776,8	0,8	776,0	0,8	776,0	0,8	776,0	0,8	0	ENTRADA COCA
gps52	371596	4563473	761,3	0,5	760,8	0,5	760,8	0,5	760,8	0,5	0	ENTRADA COCA
gps53	371592	4563524	758,7	0,5	758,2	0,5	758,2	0,5	758,2	0,5	0	ENTRADA COCA
gps56	369536	4564100	780,8	1,35	779,4	1,35	779,4	1,35	779,4	1,35	0	LENTEJON CALIZAS
gps57	368973	4565589	777,0	1,4	775,6	1,4	775,6	1,4	775,6	1,4	0	CAZ
gps58	368965	4565592	776,9	1,25	775,7	1,25	775,7	1,25	775,7	1,25	0	CAZ
gps59	368957	4565596	776,8	1,4	775,4	1,4	775,4	1,4	775,4	1,4	0	CAZ
psCTC 4	370184	4567954	740,6	-1	741,6	-1	741,6	-1	741,6	-1	0	1 M SOBRE CAUCE
gps62	369682	4569030	747,9	-1	748,9	-1	748,9	-1	748,9	-1	0	1 M SOBRE CAUCE As
gps64	370963	4565755	763,5	1	762,5	1	762,5	1	762,5	1	0	AFLORAMIENTO MARGAS

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

gps65	370956	4565763	762,8	1	761,8	1	761,8	1	761,8	1	0	AFLORAMIENTO MARGAS
gps67	370844	4565618	778,2	0	778,2	0	778,2	0	778,2	0	0	CONTACTO TALUD
gps68	371876	4564332	770,3	0	770,3	0	770,3	0	770,3	0	0	AFLORAMIENTO MARGAS
gps71	371331	4562167	770,0	3	767,0	3	767,0	3	767,0	3	0	CONTACTO TALUD
gps73	371202	4562006	773,7	0	773,7	0	773,7	0	773,7	0	0	LADERA PUENTE HIERRO
nº	X	Y	Z	E EÓLICO	m.s.n.m. EOL	E EO+FLUV	m.s.n.m. FLU	E TERCARIO	m.s.n.m. TERC	esp-eol	esp fluv	Observaciones
gps74	371199	4561988	772,4	1	771,4	1	771,4	1	771,4	1	0	
gps93	371490	4563069	781,7	5	776,7	5	776,7	5	776,7	5	0	AFLORAMIENTO MARGAS
gps96	371594	4564667	771,4	0	771,4	0	771,4	0	771,4	0	0	AFLORAMIENTO MARGAS
gps97	371210	4561691	776,8	0	776,8	0	776,8	0	776,8	0	0	AFLORAMIENTO MARGAS MI VOLTOYA
gps90	372184	4562770	774,7	5	769,7	5	769,7	5	769,7	5	0	AFLORAM BASURERO COCA
gps91	371591	4563040	754,3	0	754,3	0	754,3	0	754,3	0	0	CAUCE. CALADO RIO MARGA, ARENA Y PIEDRA

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.3. DATOS MESOESTRUCTURALES

ANEXO 2.3.1. DATOS MESOESTRUCTURALES OBTENIDOS EN LA ESTACIONES GEOMECÁNICAS Y FOTOGRAFÍAS

ANEXO 2.3.2. ÍNDICE DE GRADIENTE DEL THALWEG (SL) E ÍNDICE DE SINUOSIDAD DE ESCARPES (Vf). DATOS DE CÁLCULO

ANEXO 2.3.3. ESTUDIO DEL RELIEVE MEDIANTE DERIVADAS DIRECCIONALES. METODOLOGÍA Y CARTOGRAFÍAS



CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

nº	NOMBRE	X	Y	Z
1	MOLINO DEL QUEMAO	372301	4554428	
2	LAVADERO	371089	4558201	775,2
3	PUENTE AVE	371179	4561995	777,2
4	MOLINO DEL BATÁN	371363	4562386	769,1
5	PUENTE CHICO	371753	4563579	756,8
6	GASOLINERA COCA	371954	4563759	777
7	DEPURADORA	371715	4564512	752,2
8	CASA DE LOS OVIEDOS	370944	4565784	760,9
9	ESTRUCTURA RBF RANNEY	369310	4569329	744,4
10	MANANTIAL VILLEGUILLO	369324	4570038	742,8

ESTACIONES GEOMECÁNICAS. TOMA DE DATOS ESTRUCTURALES

nº	NOMBRE	X	Y	Z
1	MOLINO DEL QUEMAO	372301	4554428	794

INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS

300	28
300	5

2	LAVADERO	371089	4558201	775.2
---	----------	--------	---------	-------

Sin datos estructurales detectados

3	PUENTE AVE	371179	4561995	777.2
---	------------	--------	---------	-------

INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS

80	20
70	21
70	27
90	82
80	34
110	60
110	64
20	22
270	2
350	13

GRIETAS DISTENSIVAS RELLENAS CEMENTO

0	26
310	28

4	MOLINO DEL BATÁN	371363	4562386	769.1
---	------------------	--------	---------	-------

INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS

192	85
250	60
166	40

5	PUENTE CHICO ZONA RECREATIVA	371753	4563579	756.8
---	------------------------------	--------	---------	-------

INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS

342	77
310	3
80	74
90	10
330	86

GRIETAS DISTENSIVAS RELLENAS CEMENTO

60	12
348	10

6	PUENTE CHICO ARENERO	371560	4563154	753.1
---	----------------------	--------	---------	-------

PLIEGUES

48	44
38	20

LINEAMIENTOS PLIEGUES

60	20
350	10

INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS

190	80
108	84

7	GASOLINERA COCA	371954	4563759	777
GRIETAS DISTENSIVAS RELLENAS CEMENTO				
84	88			
182	73			
350	80			

8	DEPURADORA	371715	4564512	752.2
INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS				
330	2			
30	32			
76	2			

9	CASA DE LOS OVIEDOS	370944	4565784	760.9
INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS				
358	2			
260	80			

10	ESTRUCTURA RBF RANNEY	369310	4569329	744.4
Sin datos estructurales detectados				

11	MANANTIAL VILLEGUILLO	369324	4570038	742.8
Sin datos estructurales detectados				

Notación: Sentido de buzamiento//buzamiento

INTERSECCIÓN TECTÓNICA- FALLAS

GRIETAS DISTENSIVAS RELLENAS CEMENTO

Notación: Sentido de inmersión del eje//inmersión

PLIEGUES

LINEAMIENTOS PLIEGUES



eg-01.JPG



eg-02.JPG



eg-03.JPG



eg-04.JPG



eg-05.JPG



eg-06.JPG



eg-07.JPG



eg-08.JPG



eg-09.JPG



eg-10.JPG



eg-11.JPG



Pliegue-eg-6.JPG

ÍNDICE DE GRADIENTE DEL *THALWEG* (SL)**PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DEL SL Y VALOR RESULTANTE**

perfil S.L.	Perfil V.f.	X Eld	Y Eld	Z Eld	X Esc	Y Esc	Z Esc	X Erd	Y Erd	Z Erd	Vfw(m)	Vf
perfil S.L. 1												
perfil S.L. 2	perfil Vf1	371280	4555593	787.6	371338	4555595	783.8	371407	4555599	786	26	8.7
perfil S.L. 3	perfil Vf2	371220	4556241	790	371324	4556246	779.4	371388	4556245	789.6	31	3.0
perfil S.L. 4	perfil Vf3	371031	4556751	781.5	371162	4556745	775.2	371231	4556750	781.4	30	4.8
perfil S.L. 5	perfil Vf4	371142	4557682	789.7	371237	4557684	772.5	371345	4557689	787.8	34	2.1
perfil S.L. 6	perfil Vf5	371225	4558524	781.6	371308	4558522	769.7	371395	4558525	789.8	32	2.0
perfil S.L. 7	perfil Vf6	371032	4559182	792	371089	4559184	770.2	371129	4559185	764.4	24	3.0
perfil S.L. 8	perfil Vf7	370963	4559923	775.4	371000	4559921	768.7	371053	4559923	773.6	25	4.3
perfil S.L. 9	perfil Vf8	371203	4560599	766.5	371265	4560596	763.1	371320	4560602	779	23	2.4
perfil S.L. 10	perfil Vf9	371065	4561558	774.6	371203	4561554	758.1	371264	4561555	781.9	23	1.1
perfil S.L. 11	perfil Vf10	371318	4562325	776.5	371377	4562323	760	371452	4562324	763.5	21	2.1
perfil S.L. 12	perfil Vf11	371444	4562949	775.9	371485	4562948	757.7	371647	4562948	768.1	17	1.2
perfil S.L. 13	perfil Vf12	371607	4563724	776.5	371727	4563724	749.4	371854	4563724	762.8	20	1.0
perfil S.L. 14	perfil Vf13	371589	4564346	749.7	371627	4564349	744.7	371721	4564353	747.9	24	5.9
perfil S.L. 15	perfil Vf14	371564	4564836	762	371618	4564836	750	371742	4564838	743.7	17	6.0
perfil S.L. 16	perfil Vf15	371195	4565478	747.3	371280	4565483	744.8	371318	4565486	754.8	15	2.4
perfil S.L. 17	perfil Vf16	370608	4566121	746.8	370683	4566124	740.9	370762	4566126	744.1	13	2.9
perfil S.L. 18	perfil Vf17	370148	4567037	762.3	370207	4567038	739.1	370259	4567038	740.2	20	1.6
perfil S.L. 19	perfil Vf18	370194	4567746	748	370256	4567747	743.3	370284	4567748	752.8	14	2.0
perfil S.L. 20	perfil Vf19	370063	4568420	769.4	370190	4568421	738.5	370286	4568425	767.4	16	0.5
perfil S.L. 21	perfil Vf20	369266	4569303	762.1	369382	4569307	737.9	369438	4569305	747.1	22	1.3
perfil S.L. 22	perfil Vf21	369111	4570247	757.5	369147	4570270	737.5	369260	4570343	763	17	0.7

Tabla 1. Coordenadas de los puntos seleccionados, parámetros medidos y valor del SL resultante.

LEYENDA:

- X, Y y Z. Coordenadas UTM de los puntos tomados a 100, 200 y 300 metros, aproximadamente, del cauce en ambas márgenes.
- Z Thalweg. Coordenada del Thalweg en el perfil, en metros sobre el nivel del mar.
- Hn. Diferencia de altura para cada punto con respecto al anterior.
- L n. Distancia aproximada del punto de medida al thalweg en cada perfil.
- I Hn/ I Ln. Gradiente consecutivo entre los puntos correlativos.
- L. Factor L o distancia del perfil a la divisoria de aguas.
- SL. Índice de gradiente del Thalweg.

ÍNDICE DE SINUOSIDAD DE ESCARPES (VF)**PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DEL VF (vfw) Y VALOR RESULTANTE**

perfil SL	Perfil V.f.	X Eld	Y Eld	Z Eld	X Esc	Y Esc	Z Esc	X Erd	Y Erd	Z Erd	Vfw(m)	Vf
perfil SL 1												
perfil SL 2	perfil Vf1	371280	4555593	787.6	371338	4555595	783.8	371407	4555599	786	26	8.7
perfil SL 3	perfil Vf2	371220	4556241	790	371324	4556246	779.4	371388	4556245	789.6	31	3.0
perfil SL 4	perfil Vf3	371031	4556751	781.5	371162	4556745	775.2	371231	4556750	781.4	30	4.8
perfil SL 5	perfil Vf4	371142	4557682	789.7	371237	4557684	772.5	371345	4557689	787.8	34	2.1
perfil SL 6	perfil Vf5	371225	4558524	781.6	371308	4558522	769.7	371395	4558525	789.8	32	2.0
perfil SL 7	perfil Vf6	371032	4559182	792	371089	4559184	770.2	371129	4559185	764.4	24	3.0
perfil SL 8	perfil Vf7	370963	4559923	775.4	371000	4559921	768.7	371053	4559923	773.6	25	4.3
perfil SL 9	perfil Vf8	371203	4560599	766.5	371265	4560596	763.1	371320	4560602	779	23	2.4
perfil SL 10	perfil Vf9	371065	4561558	774.6	371203	4561554	758.1	371264	4561555	781.9	23	1.1
perfil SL 11	perfil Vf10	371318	4562325	776.5	371377	4562323	760	371452	4562324	763.5	21	2.1
perfil SL 12	perfil Vf11	371444	4562949	775.9	371485	4562948	757.7	371647	4562948	768.1	17	1.2
perfil SL 13	perfil Vf12	371607	4563724	776.5	371727	4563724	749.4	371854	4563724	762.8	20	1.0
perfil SL 14	perfil Vf13	371589	4564346	749.7	371627	4564349	744.7	371721	4564353	747.9	24	5.9
perfil SL 15	perfil Vf14	371564	4564836	762	371618	4564836	750	371742	4564838	743.7	17	6.0
perfil SL 16	perfil Vf15	371195	4565478	747.3	371280	4565483	744.8	371318	4565486	754.8	15	2.4
perfil SL 17	perfil Vf16	370608	4566121	746.8	370683	4566124	740.9	370762	4566126	744.1	13	2.9
perfil SL 18	perfil Vf17	370148	4567037	762.3	370207	4567038	739.1	370259	4567038	740.2	20	1.6
perfil SL 19	perfil Vf18	370194	4567746	748	370256	4567747	743.3	370284	4567748	752.8	14	2.0
perfil SL 20	perfil Vf19	370063	4568420	769.4	370190	4568421	738.5	370286	4568425	767.4	16	0.5
perfil SL 21	perfil Vf20	369266	4569303	762.1	369382	4569307	737.9	369438	4569305	747.1	22	1.3
perfil SL 22	perfil Vf21	369111	4570247	757.5	369147	4570270	737.5	369260	4570343	763	17	0.7

Tabla 2. Coordenadas de los puntos seleccionados, parámetros medidos y valor del Vfw resultante

LEYENDA:

- Vfw es la anchura del fondo del valle en el punto de medida.
- Eld y Erd son las cotas de la divisoria de aguas en la margen izquierda y derecha respectivamente.
- Esc es la cota media del fondo de valle en el punto de medida.
- X e Y son las coordenadas UTM de los puntos extremos.

Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 2.03, en la que aparecen las coordenadas UTM X, Y y Z de los puntos Eld, Esc y Erd, así como la anchura del fondo del valle en cada perfil (Vfw). Con estos datos se ha calculado el índice Vf.

ANEXO 2.3.3. ESTUDIO DE LAS DERIVADAS DIRECCIONALES DEL MAPA DE PENDIENTES DEL PALEORRELIEVE

Como técnica adicional a la observación de imágenes actuales, se ha propuesto y aplicado una nueva metodología, basada en la observación del relieve, tanto el que hay en la actualidad, como el que había a finales del período terciario.

Esta técnica está basada en el estudio de las **derivadas direccionales del mapa de pendientes del paleorrelieve**. Dicha técnica constituye una línea de investigación de la que no se han encontrado citas bibliográficas. Se pretende, por tanto, comprobar su validez para los objetivos previstos.

La reconstrucción del paleorrelieve es descrita en el Apartado 5.5, donde se ha elaborado un bloque diagrama del aspecto del paleorrelieve y un mapa de isopacas del acuífero cuaternario superficial.

Con todos los datos disponibles directos (datos de perforaciones) e indirectos (datos obtenidos de campañas de prospección geofísica citadas en IRYDA, 1990 y MAPA, 1999a), se han generado las mallas necesarias para reconstruir el relieve actual y el paleorrelieve.

La reconstrucción correspondiente a la actualidad se ha llevado a cabo a partir del Modelo Digital del Terreno actual; mientras que la orografía de la zona de estudio en el período de transición del Terciario al Cuaternario, es decir, la cartografía del techo de las Facies Cuestas (en la *Cubeta* no se han encontrado afloramientos de Facies Páramos), surge de un bloque diagrama y una malla topográfica deducida a partir de los datos mencionados.

El criterio se apoya en la suposición de que el paleorrelieve puede reflejar mejor las discontinuidades estructurales del basamento que el relieve actual, ya que los sedimentos cuaternarios pueden enmascarar cierta información.

Para ello se ha investigado qué técnica permite realzar diferencias topográficas acusadas y/o fuertes contrastes en la geomorfología del terreno, experimentando con la aplicación de derivadas direccionales para tal fin. Esta técnica se considera apropiada, *a priori*, por las siguientes razones:

- Permite su empleo en mallas generadas con un MDT mediante aplicaciones GIS.
- Más que la pendiente, proporciona información relativa al rango de variación de la pendiente en una dirección especificada.
- La elaboración de mapas de contornos permite detectar líneas de pendiente constante o isoinclinación en una dirección determinada.
- Existen módulos adicionales para el cálculo de la pendiente máxima de cada nodo del grid, entre 0 y 90°, lo que permite elaborar mapas de isolíneas de

pendiente máxima, independientemente de la dirección especificada en la derivada direccional.

La pendiente S de un nodo determinado de una malla (P) equivale a la magnitud del gradiente en ese punto. El gradiente, por definición, corresponde a la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$$

Aplicando la ecuación de diferencia entre los nodos de una malla, resulta:

$$S \approx \sqrt{\left(\frac{Z_e - Z_w}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{Z_n - Z_s}{2\Delta y}\right)^2}$$

La pendiente del terreno queda representada como un ángulo St medido en grados correspondiente a la ecuación de Moore (*Moore et al, 1993*):

$$St \approx \frac{360}{2\pi} \cdot \arctg \left[\sqrt{\left(\frac{Z_e - Z_w}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{Z_n - Z_s}{2\Delta y}\right)^2} \right]$$

Se ha aplicado la técnica descrita al MDT del techo de las Facies Cuestas mediante la aplicación informática *Surfer 8*, módulos *grid/calculus/directional derivative/terrain slope*.

Además del módulo *terrain slope*, se ha aplicado la derivada direccional 1 en dirección norte sur.

Aplicando el método de ensayo y error, se han generado mapas de contornos para la derivada direccional primera y para el módulo citado, cuya representación se presenta en las Figuras 1 a 5. Estas corresponden, respectivamente, al mapa de pendientes actual (Fig. 1), al mapa de pendientes del paleorrelieve (Fig. 2), al mapa de pendiente actual según la dirección de máxima pendiente (Fig. 3), y según la dirección de la derivada direccional N-S (Fig. 4), y al mapa de pendiente del paleorrelieve según la derivada direccional N-S (Fig. 5).

Fig. 1. Mapa de pendientes actual

Fig. 2. Mapa de pendientes del paleorrelieve.

Fig. 3. Mapa de pendiente actual. Derivada direccional N-S.

Fig. 4. Mapa de pendiente del paleorrelieve. Derivada direccional N-S.

Fig. 5. Cartografía de isopendientes máximas para el techo del acuitardo terciario en la zona de estudio y lineamientos interpretados.

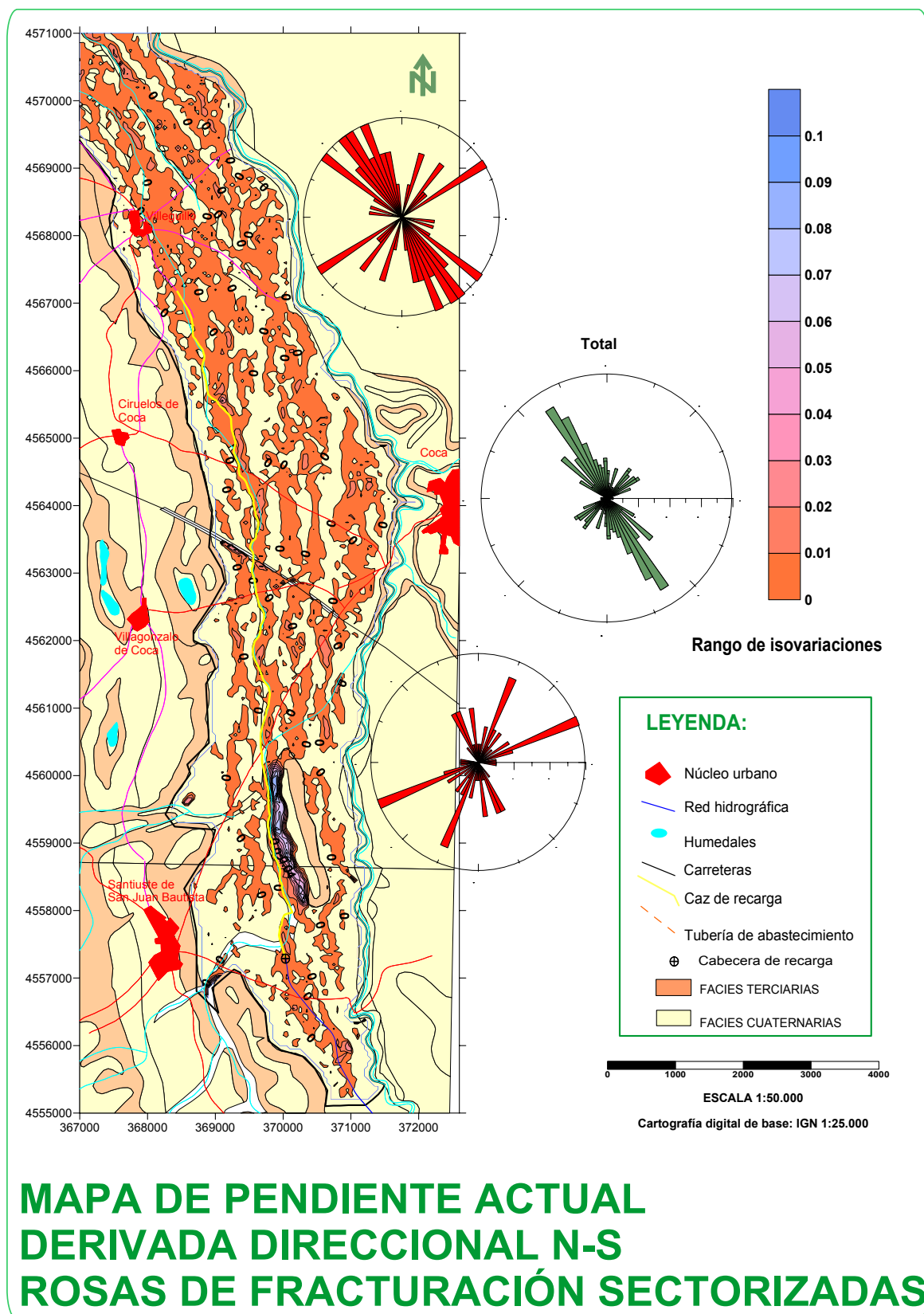


Fig. 1. Mapa de pendientes actual con representación sectorizada de las rosas de fracturación deducidas a partir de los lineamientos y aplicación de derivadas direccionales al paleorrelieve.

La siguiente figura corresponde a la derivada direccional según la dirección de máxima pendiente del paleorrelieve (contacto Facies Cuestas-Fm. Arévalo), sobre la que se ha realizado un ajuste de lineamientos.

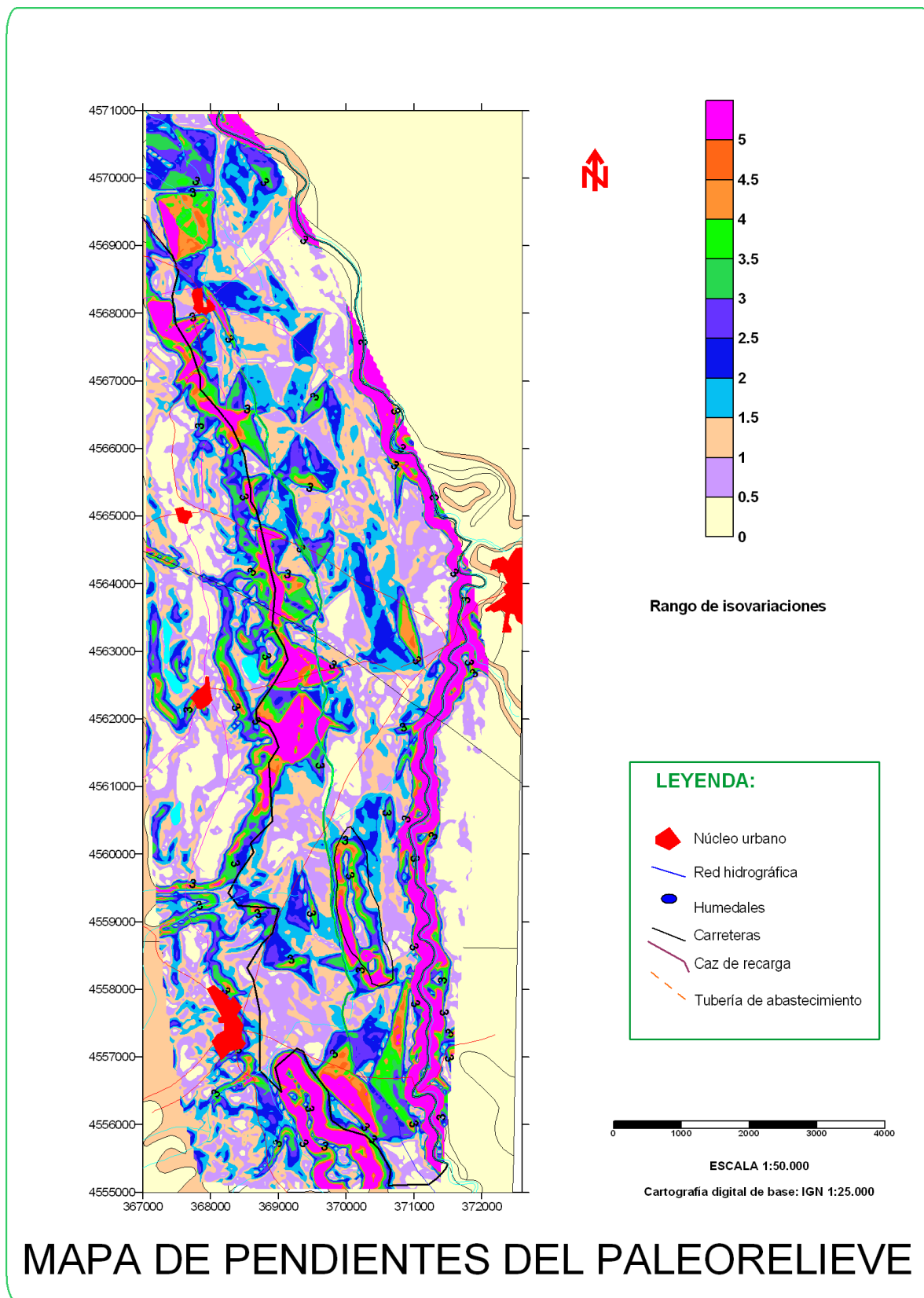


Fig. 2. Mapa de pendientes del paleorelieve.

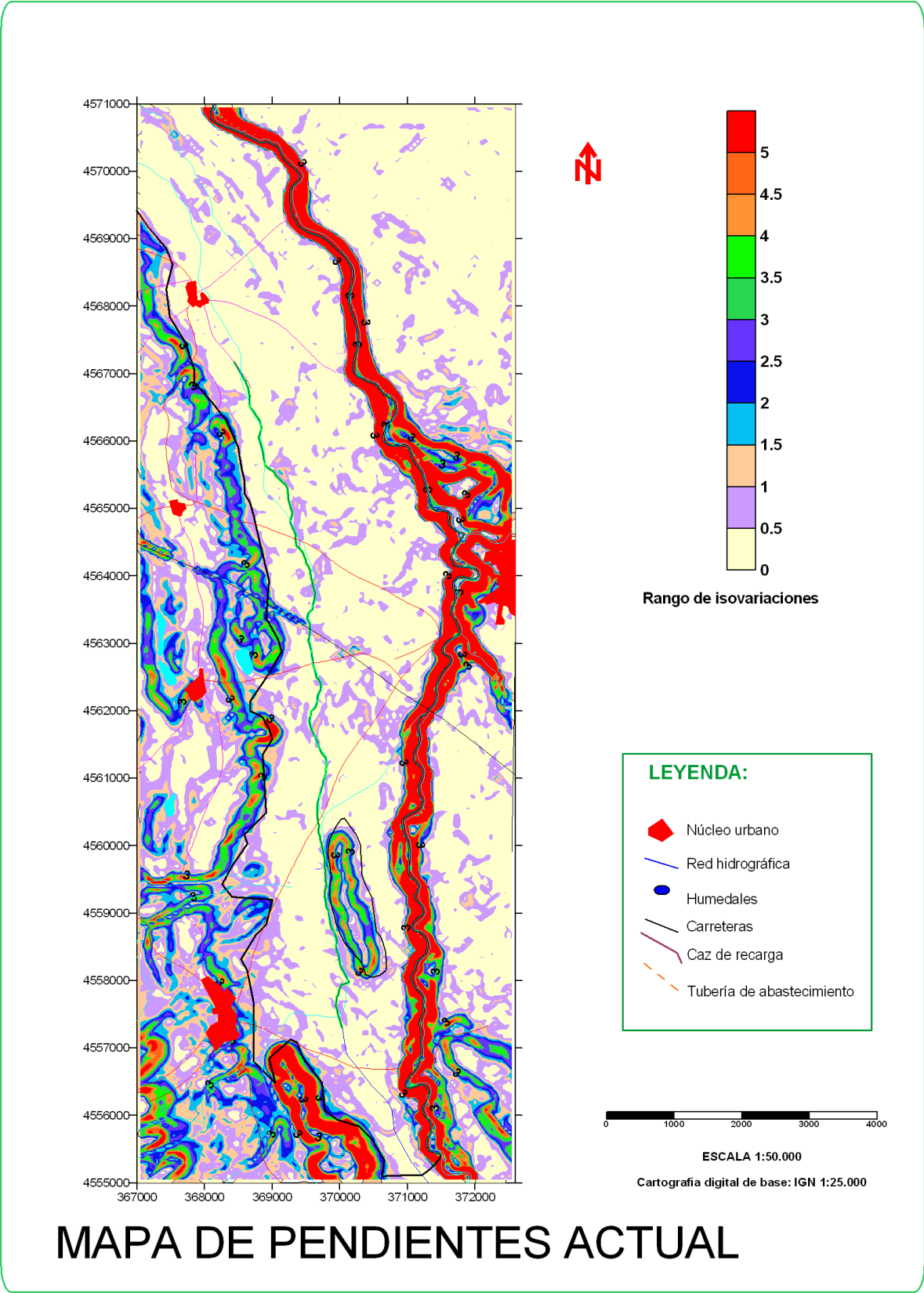


Fig. 3. Mapa de pendiente actual. Derivada direccional N-S.

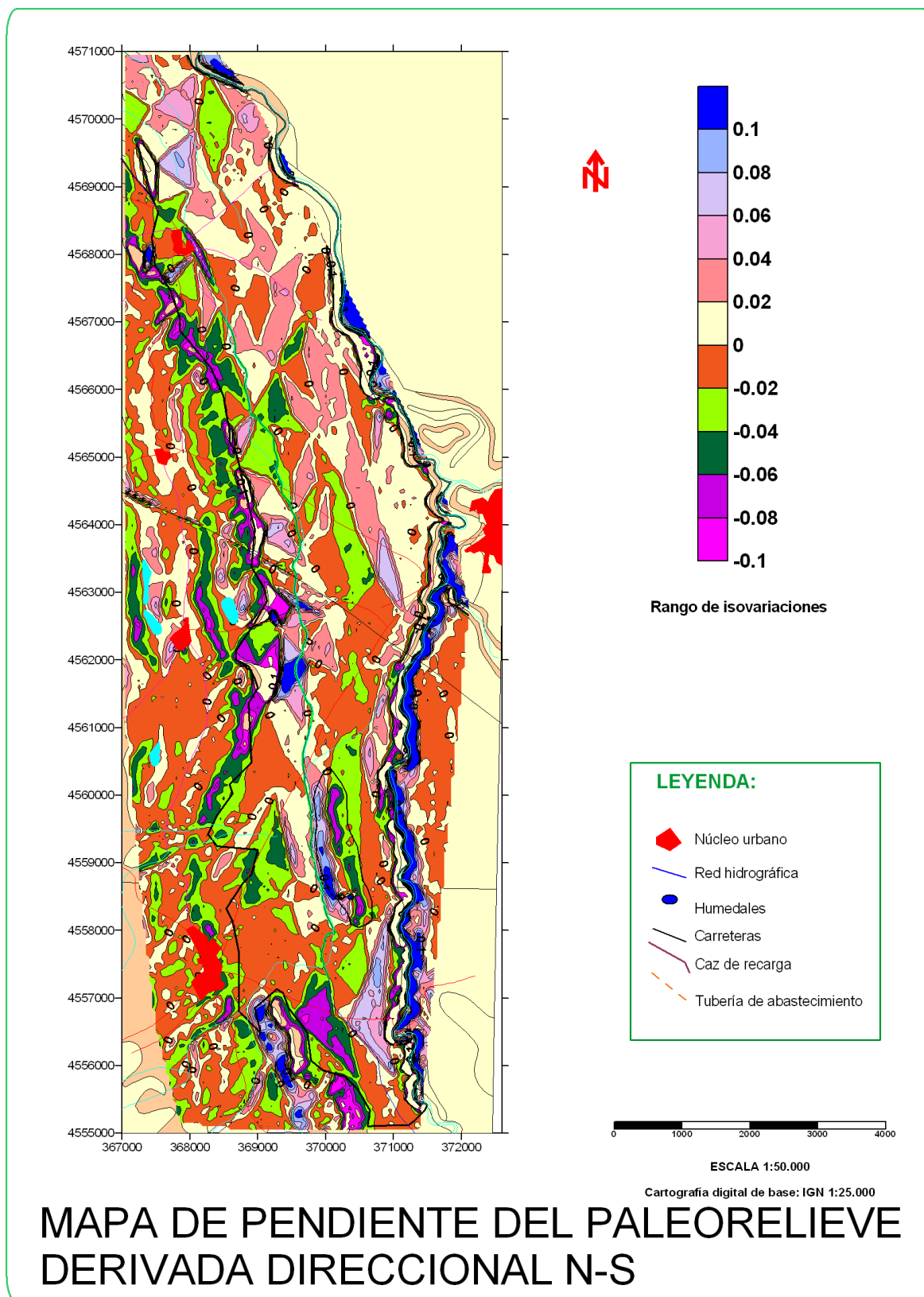


Fig.4. Mapa de pendiente del paleorelieve. Derivada direccional N-S.

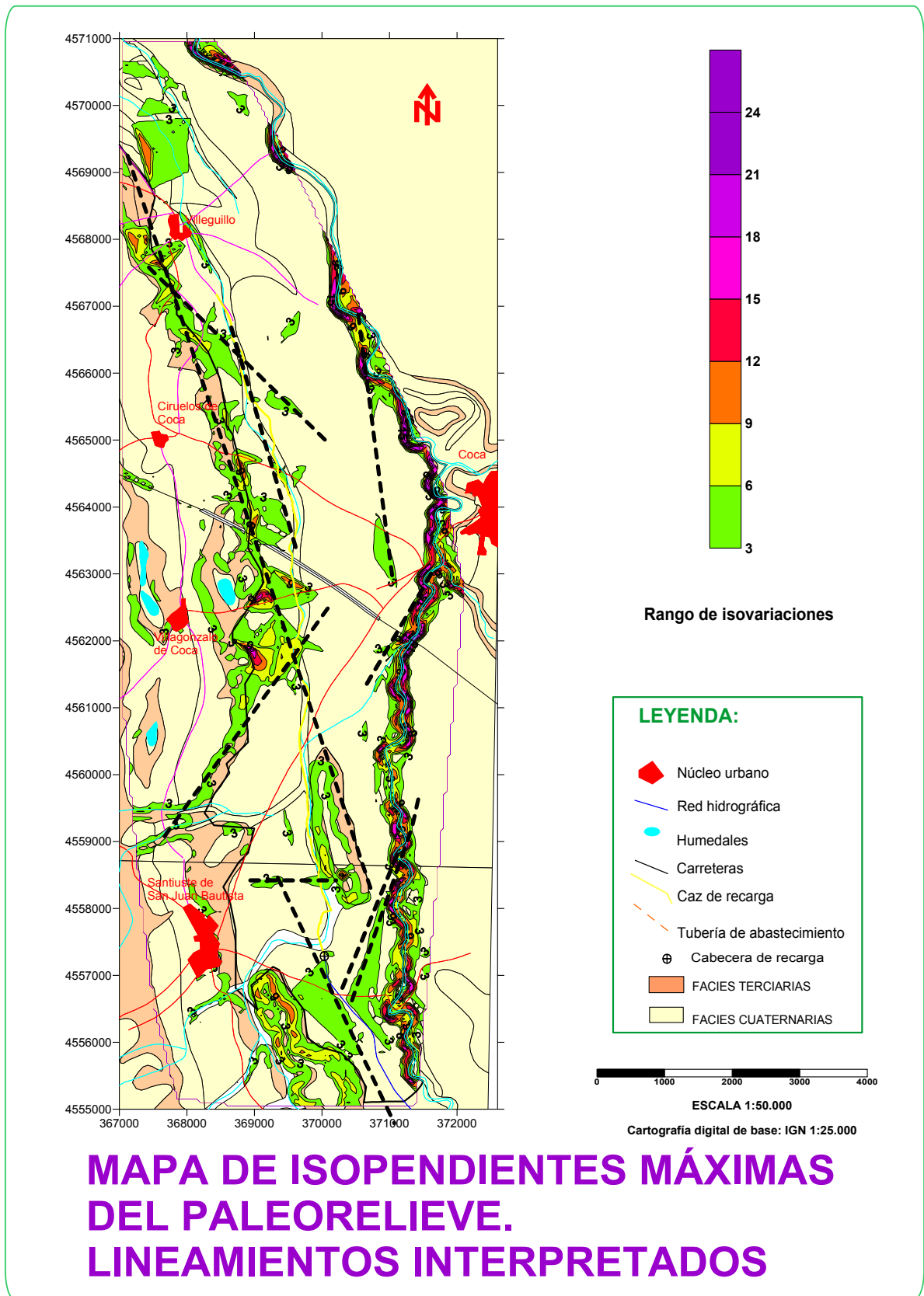


Fig. 5. Cartografía de isopendientes máximas para el techo del acuitardo terciario en la zona de estudio y lineamientos interpretados.

El análisis de las figuras permite apreciar que existen ciertas orientaciones en las que las “manchas” del mapa coroplético, correspondiente a isolíneas de pendiente máxima de los nodos de la malla, se ajusta a una serie de lineamientos cuyas orientaciones se asemejan a las deducidas en el apartado previo.

Esta técnica, que aparentemente aporta resultados relativos a las direcciones de fracturación, debe ser testada en otros contextos y circunstancias.

Con los lineamientos interpretados se han realizado las siguientes rosas de fracturación (Figs. 6 a y b).

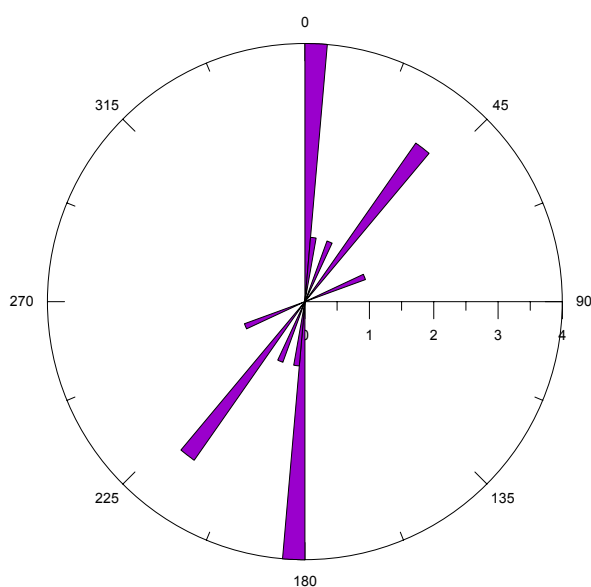


Fig. 6 a. Representación de los lineamientos deducidos sobre las cartografías realizadas sobre el relieve actual.

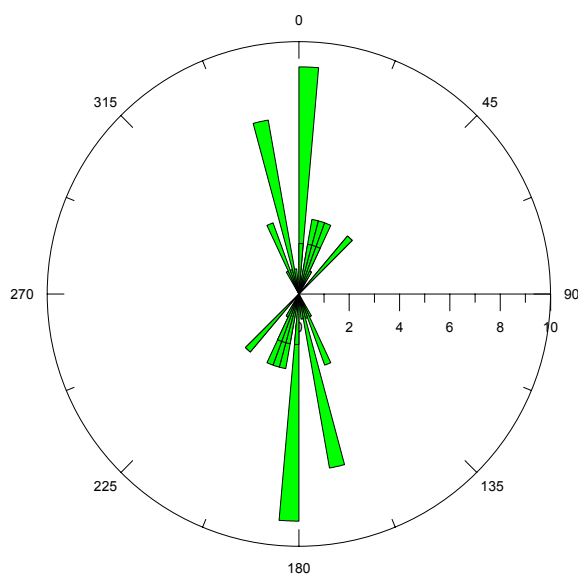


Fig. 6 b. Representación de los lineamientos deducidos sobre las cartografías realizadas sobre el paleorrelieve. Predominan las orientaciones NNE-SSO y NE-SO.

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.4. DATOS CLIMÁTICOS Y BALANCE HÍDRICO

ANEXO 2.4.1. DATOS CLIMÁTICOS. ESTACIÓN 2502, SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

- PRECIPITACIÓN MENSUAL
- TEMPERATURA

ANEXO 2.4.2. BALANCE HÍDRICO. CÁLCULO POR LOS MÉTODOS DIRECTO Y EL EXPONENCIAL



CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS
LISTADO DE DATOS TERMOMETRICOS

2502-TMP.TMP
Hora: 10:48:14
Página: 2

Fecha: 19/11/03

Temperatura media de máximas

TIPO DE DATO: 24

UNIDAD: °C

SERIE: 1987-2002

INDICATIVO: 2502

DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

PROVINCIA: SEGOVIA

TIPO: TERMOPLUVIO

LATITUD: 41°09'25" N

LONGITUD: 04°34'17" W

ALTITUD: 820 m

ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	MED.AÑO
1987	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	12.5	9.9	11.2
1988	9.0	9.1	15.2	15.1	18.2	22.2	28.3	31.3	26.9	-----	15.1	7.7	18.0
1989	9.9	12.8	17.0	13.7	23.1	26.4	32.3	-----	24.7	21.5	14.1	-----	19.6
1990	7.6	14.0	16.5	-----	-----	28.4	32.8	32.0	28.2	18.4	11.8	7.9	19.8
1991	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1992	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1993	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1994	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1995	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1996	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1997	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1998	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	19.3	13.2	8.6	13.7
1999	9.2	10.7	-----	17.9	22.8	28.0	32.1	30.4	25.0	18.5	10.5	-----	20.5
2000	-----	15.7	17.0	14.2	22.0	28.6	29.2	29.9	26.8	18.9	11.0	10.5	20.3
2001	9.4	11.6	15.2	17.2	22.6	30.0	29.0	30.7	25.2	20.5	11.3	8.3	19.3
2002	10.9	12.8	15.2	17.8	20.2	28.3	29.4	28.5	24.0	18.8	12.4	10.9	19.1

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS

LISTADO DE DATOS TERMOMETRICOS

2502-TMP.TMP

Hora: 10:48:14
Página: 3

Fecha: 19/11/03

Temperatura media mensual

TIPO DE DATO: 26

UNIDAD: °C

SERIE: 1987-2002

INDICATIVO: 2502

DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

PROVINCIA: SEGOVIA

TIPO: TERMOPLUVIO

LATITUD: 41°09'25" N

LONGITUD: 04°34'17" W

ALTITUD: 820 m

ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	MED.AÑO
1987	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	11.6	7.7	6.0	8.4
1988	5.7	4.4	8.1	10.2	12.8	15.7	20.3	22.0	18.4	-----	8.5	2.4	11.7
1989	3.2	6.0	10.0	8.4	15.8	18.8	23.3	23.2	17.1	14.2	10.2	8.5	13.2
1990	3.4	8.6	9.2	8.4	15.2	20.5	23.5	23.0	20.6	13.4	6.7	2.8	12.9
1991	3.8	4.3	8.8	-----	-----	19.2	22.9	24.2	20.0	10.6	7.2	5.2	12.6
1992	1.2	5.2	8.1	10.4	16.8	15.2	23.2	22.4	17.5	10.8	8.8	5.1	12.1
1993	2.0	4.1	7.5	9.2	12.9	18.1	20.9	21.8	15.5	9.7	6.3	6.2	11.2
1994	3.7	5.8	10.4	9.0	14.6	18.4	23.9	23.0	15.7	13.6	9.2	5.8	12.8
1995	5.3	7.2	8.3	11.2	16.2	19.6	23.0	-----	15.6	16.0	9.9	6.2	12.6
1996	6.4	4.2	7.7	11.0	-----	20.0	22.0	20.8	16.2	12.7	8.0	5.4	12.2
1997	4.2	8.6	11.2	-----	14.4	16.8	-----	22.6	-----	14.6	8.8	5.8	11.9
1998	6.0	8.0	10.6	9.2	13.5	19.4	22.4	23.4	18.6	12.4	7.4	3.2	12.8
1999	4.0	4.6	-----	10.6	15.6	19.2	23.2	22.3	18.6	13.2	5.2	-----	13.7
2000	-----	8.4	8.8	9.0	15.4	19.9	20.6	20.9	18.5	12.2	7.0	6.8	13.4
2001	5.8	5.7	10.5	10.0	14.9	21.2	21.2	22.7	17.1	14.4	5.1	1.2	12.5
2002	5.8	6.4	8.8	10.6	13.3	20.4	21.2	20.4	17.1	13.4	8.9	7.8	12.8

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS

2502-TMP.TMP

Fecha: 19/11/03

LISTADO DE DATOS TERMOMETRICOS

Hora: 10:48:14

Página: 4

Temperatura media de mínimas

TIPO DE DATO: 25

UNIDAD: °C

SERIE: 1987-2002

INDICATIVO: 2502

DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

PROVINCIA: SEGOVIA

TIPO: TERMOPLUVIO

LATITUD: 41°09'25" N

LONGITUD: 04°34'17" W

ALTITUD: 820 m

ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	MED.AÑO
1987	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	7.5	3.0	2.1	4.2
1988	2.4	-0.3	1.0	5.4	7.4	9.2	12.3	12.7	9.8	-----	1.9	-3.0	5.3
1989	-3.5	-0.8	3.0	3.0	8.4	11.2	14.3	14.9	9.5	6.9	6.2	5.1	6.5
1990	-0.7	3.1	2.0	2.5	7.7	12.6	14.2	14.0	13.1	8.3	1.6	-2.3	6.3
1991	-0.7	-0.8	4.6	-----	-----	10.8	14.3	15.6	13.2	5.3	1.9	-0.6	6.4
1992	-4.4	-2.3	0.4	3.3	9.5	9.6	15.2	14.7	10.0	6.7	3.8	1.2	5.6
1993	-3.4	-2.6	1.2	3.1	6.7	10.8	11.8	13.3	9.3	5.2	1.2	2.3	4.9
1994	-1.0	0.2	2.6	1.5	8.1	9.7	14.6	14.4	8.2	7.9	3.6	1.6	5.9
1995	0.7	1.4	0.7	2.5	8.7	11.2	14.7	-----	8.8	9.0	4.7	2.1	5.9
1996	2.6	-0.7	1.6	4.2	-----	11.7	13.4	13.0	8.3	5.6	2.7	1.7	5.8
1997	0.2	2.5	1.6	-----	8.1	10.3	-----	15.0	-----	7.8	5.0	2.0	5.8
1998	1.5	1.1	3.2	4.0	6.7	11.1	13.4	14.2	11.7	5.4	1.5	-2.2	6.0
1999	-1.2	-1.6	-----	3.2	8.4	10.3	14.3	14.2	12.3	7.8	0.0	-----	6.8
2000	-----	1.1	0.5	3.7	8.9	11.2	12.0	11.9	10.2	5.6	3.1	3.0	6.5
2001	2.1	-0.2	5.8	2.8	7.2	12.3	13.4	14.7	9.0	8.3	-1.1	-5.9	5.7
2002	0.8	0.1	2.3	3.5	6.4	12.6	12.9	12.4	10.2	8.1	5.4	4.8	6.6

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS
LISTADO DE DATOS TERMOMETRICOS

2502-TMP.TMP
Hora: 10:48:14
Página: 5

Fecha: 19/11/03

Temperatura mínima absoluta

TIPO DE DATO: 23

UNIDAD: °C

SERIE: 1987-2002

INDICATIVO: 2502

DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

PROVINCIA: SEGOVIA

TIPO: TERMOPLUVIO

LATITUD: 41°09'25" N

LONGITUD: 04°34'17" W

ALTITUD: 820 m

ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	MED.AÑO
1987	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-4.0	-5.6	-4.8
1988	-----	-----	-6.0	-2.5	4.0	2.6	-----	6.5	3.6	-----	-11.0	-10.0	-1.6
1989	-9.5	-6.5	-6.0	-2.6	2.5	4.5	10.8	-----	3.0	1.6	0.5	-----	-0.2
1990	-6.6	-5.0	-4.2	-----	-----	6.5	8.5	7.8	9.5	0.5	-4.0	-8.0	0.5
1991	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1992	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1993	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1994	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1995	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1996	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1997	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1998	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-0.1	-7.6	-7.0	-4.9
1999	-9.0	-8.3	-----	-1.2	3.5	5.0	9.5	10.0	7.0	2.0	-4.7	-----	1.4
2000	-----	-3.0	-4.5	-----	4.5	3.0	6.3	6.5	5.5	1.0	-3.4	-3.0	1.3
2001	-2.0	-7.0	-1.0	-3.0	-0.5	3.8	7.5	10.0	-----	2.0	-7.2	-14.0	-1.0
2002	-5.0	-5.5	-3.5	-2.5	-1.5	4.5	7.0	7.0	0.6	1.5	-1.0	-2.0	0.0

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS
LISTADO DE DATOS TERMOMETRICOS

2502-TMP.TMP
Hora: 10:48:14
Página: 6

Fecha: 19/11/03

Temperatura máxima absoluta

TIPO DE DATO: 22

UNIDAD: °C

SERIE: 1987-2002

INDICATIVO: 2502

DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

PROVINCIA: SEGOVIA

TIPO: TERMOPLUVIO

LATITUD: 41°09'25" N

LONGITUD: 04°34'17" W

ALTITUD: 820 m

ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	MED.AÑO
1987	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	21.0	19.0	20.0
1988	-----	-----	23.0	22.5	24.0	29.2	-----	37.5	38.2	-----	21.2	14.5	26.3
1989	15.3	19.8	25.0	19.3	28.5	32.0	37.5	-----	29.6	27.6	23.5	-----	25.8
1990	12.8	21.0	25.2	-----	-----	35.5	38.8	37.5	32.7	32.0	17.8	14.5	26.8
1991	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1992	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1993	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1994	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1995	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1996	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1997	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0
1998	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	25.4	20.0	15.5	20.3
1999	17.5	17.5	-----	26.0	30.7	37.0	38.4	37.0	32.0	25.0	-----	-----	29.0
2000	-----	20.0	24.0	-----	30.5	35.5	37.0	37.0	35.0	27.0	18.0	16.5	28.1
2001	15.0	17.0	23.5	23.0	35.7	37.0	37.0	37.0	-----	28.0	18.8	14.5	26.0
2002	17.5	19.0	24.5	27.0	29.9	37.0	37.0	36.0	29.0	-----	19.0	16.0	26.5

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS
LISTADO DE DATOS PLUVIOMETRICOS (DATPREC.DBF)

2502PLU-.PLU

Fecha: 19/11/03
Hora: 10:48:51
Página: 2

Precipitación mensual
INDICATIVO: 2502

TIPO DE DATO: 20
DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA
LATITUD: 41°09'25" N LONGITUD: 04°34'17" W

UNIDAD: mm SERIE: 1967-2002
PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
ALTITUD: 820 m ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												TOT.AÑO
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	
1967	21.2	27.7	22.3	54.2	65.7	14.0	IP	15.3	13.6	44.5	104.6	-----	383.1
1968	-----	63.8	47.4	25.5	37.9	15.1	1.2	18.8	3.6	19.5	55.6	54.3	342.7
1969	33.3	29.7	74.9	49.5	25.6	19.6	13.8	4.3	83.3	15.5	65.2	10.9	425.6
1970	137.5	3.9	22.9	3.2	24.5	31.3	8.2	44.5	5.7	IP	35.6	6.7	324.0
1971	43.7	3.7	16.4	120.3	75.4	26.4	63.9	6.0	2.1	6.6	21.4	11.1	397.0
1972	22.7	65.6	13.7	18.1	42.0	23.7	26.3	1.6	62.1	79.9	19.0	64.5	439.2
1973	16.6	2.6	43.2	2.2	68.5	41.7	35.3	0.6	0.5	6.5	50.6	15.7	284.0
1974	21.9	38.6	46.2	34.1	18.2	1.9	IP	0.4	3.8	8.2	55.8	8.6	237.7
1975	30.5	17.5	38.1	69.9	118.2	90.5	IP	27.1	36.8	11.3	27.5	38.3	505.7
1976	16.1	30.7	15.2	57.5	8.1	39.5	65.7	33.5	56.5	59.1	54.8	79.9	516.6
1977	84.0	59.0	22.9	34.7	79.6	78.5	46.3	14.1	10.1	79.3	16.1	56.2	580.8
1978	43.0	83.9	32.5	80.4	51.0	68.5	2.3	9.0	30.1	3.6	30.2	152.4	586.9
1979	107.3	206.4	183.2	66.5	34.9	45.3	16.4	2.4	27.9	158.2	30.9	20.2	899.6
1980	14.4	26.8	56.6	81.0	109.3	64.6	15.2	24.4	14.3	43.4	24.3	14.0	488.3
1981	2.6	35.4	58.3	54.5	31.1	9.0	25.7	29.4	16.2	5.9	0.0	149.4	417.5
1982	18.9	24.3	8.6	21.7	44.9	34.6	24.1	13.1	62.2	22.9	29.1	28.4	332.8
1983	IP	26.2	4.0	61.3	59.7	23.0	16.7	27.6	9.9	5.8	56.3	51.2	341.7
1984	56.7	14.1	44.6	48.5	89.1	47.3	10.0	11.5	2.0	43.3	85.3	15.8	468.2
1985	56.6	38.8	18.6	52.0	52.4	18.2	32.0	0.0	7.2	4.0	62.0	66.0	407.8
1986	31.5	81.0	17.2	54.0	28.0	IP	15.0	14.7	54.4	55.3	27.8	43.5	422.4
1987	63.0	73.5	20.2	41.8	22.3	14.8	75.1	9.6	30.0	75.9	14.5	39.7	480.4
1988	55.4	5.8	0.8	93.2	93.6	70.3	20.8	1.5	2.7	25.5	24.7	4.3	398.6
1989	10.0	37.9	26.1	117.1	54.4	15.0	27.4	18.1	16.3	12.0	103.2	101.7	539.2
1990	32.7	13.0	13.5	54.6	18.3	43.8	11.5	7.0	18.1	63.1	39.9	29.3	344.8
1991	34.9	47.3	43.5	40.1	8.3	3.1	3.9	IP	59.0	26.5	17.3	8.5	292.4
1992	13.1	6.3	5.7	32.0	28.8	39.4	7.6	33.0	20.0	102.8	7.9	30.6	327.2
1993	4.1	6.9	33.5	27.2	60.0	35.2	IP	15.1	32.0	170.1	39.4	10.5	434.0
1994	38.2	51.6	3.3	14.3	156.5	16.5	9.5	2.6	7.5	81.0	53.8	52.5	487.3
1995	41.0	90.2	-----	35.5	36.4	65.5	17.8	9.6	24.8	13.9	74.1	70.6	479.4
1996	81.2	42.6	57.3	34.8	59.7	IP	28.2	IP	31.7	9.2	43.0	114.4	502.1
1997	69.5	5.5	0.0	40.6	65.4	36.5	75.9	25.2	54.5	31.0	166.5	111.2	681.8
1998	42.5	19.3	6.8	61.1	92.6	20.0	2.7	12.0	33.2	10.9	26.7	44.9	372.7
1999	38.0	17.5	17.7	35.5	22.6	20.5	20.0	6.5	48.8	81.0	10.0	-----	318.1
2000	-----	0.7	24.3	61.4	84.8	5.5	12.5	8.0	22.2	34.0	69.7	62.1	385.2
2001	104.5	22.5	53.0	3.5	14.0	8.5	30.5	17.5	17.7	45.3	5.0	5.5	327.5
2002	40.2	13.5	34.5	33.7	44.6	26.5	13.0	22.0	22.7	61.5	73.4	44.0	429.6

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A.
I.R.Y.D.A.

SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS 2502PLU-.PLU
LISTADO DE DATOS PLUVIOMETRICOS (DATPREC.DBF)

Fecha: 19/11/03
Hora: 10:48:51
Página: 3

Precipitación máxima en 24 horas TIPO DE DATO: 21 UNIDAD: mm SERIE: 1967-2002
INDICATIVO: 2502 DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
LATITUD: 41°09'25" N LONGITUD: 04°34'17" W ALTITUD: 820 m ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----													
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	MED.AÑO	MAX24H
1967	11.7	5.4	16.7	18.8	18.7	8.0	IP	9.3	13.6	25.5	31.0	-----	14.4	31.0
1968	-----	10.7	16.3	7.1	9.9	9.1	1.2	11.8	2.3	13.5	12.7	12.3	9.7	16.3
1969	9.6	7.4	17.6	31.7	7.4	9.3	8.7	4.3	12.0	4.6	35.0	3.2	12.6	35.0
1970	21.0	2.7	9.6	1.8	7.0	23.2	7.3	27.0	5.7	IP	11.3	3.2	10.0	27.0
1971	15.6	2.3	8.2	46.4	14.8	3.6	18.9	6.0	1.3	2.9	6.7	6.3	11.1	46.4
1972	7.6	29.2	4.0	5.3	16.3	7.5	13.9	1.6	23.2	15.3	5.2	40.5	14.1	40.5
1973	5.9	1.2	36.6	0.9	26.2	10.7	21.3	0.6	0.3	4.8	34.6	8.3	12.6	36.6
1974	8.0	15.4	16.4	7.6	16.2	0.8	IP	0.4	3.5	5.0	15.0	7.6	8.0	16.4
1975	10.3	5.4	8.2	17.5	45.2	18.2	IP	8.5	12.0	5.5	9.0	20.6	13.4	45.2
1976	12.5	6.6	6.0	20.0	6.4	15.5	22.5	10.0	26.0	9.2	18.5	22.6	14.7	26.0
1977	17.5	10.0	6.3	20.0	29.5	27.6	11.0	7.2	9.0	28.5	7.2	10.0	15.3	29.5
1978	19.0	16.9	12.4	20.2	10.5	18.7	2.3	9.0	18.5	3.6	12.5	31.6	14.6	31.6
1979	19.6	31.0	39.8	39.9	11.4	36.5	10.5	2.4	16.9	26.6	14.4	12.8	21.8	39.9
1980	3.4	10.5	19.4	38.4	31.5	38.8	10.5	20.5	10.9	20.5	8.6	5.8	18.2	38.8
1981	1.2	18.5	13.5	16.4	10.8	8.4	16.8	12.8	8.2	5.4	0.0	52.4	13.7	52.4
1982	8.2	6.5	6.4	7.1	15.6	11.9	18.5	13.1	41.7	7.5	12.0	10.2	13.2	41.7
1983	IP	17.4	3.0	16.6	14.5	7.0	13.5	22.3	6.5	4.0	18.2	28.8	12.7	28.8
1984	16.2	9.0	9.0	10.0	22.3	21.0	10.0	11.0	2.0	14.5	20.0	7.0	12.7	22.3
1985	20.0	10.0	8.0	20.0	21.0	6.7	31.0	0.0	7.0	4.0	19.0	15.0	13.5	31.0
1986	15.0	14.0	8.0	15.5	14.0	IP	15.0	12.5	29.5	17.0	11.0	23.5	14.6	29.5
1987	27.0	32.0	6.5	12.5	12.0	5.0	36.0	4.0	21.8	33.5	10.0	12.0	17.7	36.0
1988	-----	2.0	0.7	17.0	26.5	17.5	9.5	1.0	2.7	9.5	15.4	2.0	9.4	26.5
1989	10.0	12.0	15.5	25.0	11.0	4.7	8.5	8.0	10.0	7.0	26.0	32.0	14.1	32.0
1990	13.2	5.0	9.5	13.0	9.0	18.0	9.2	5.0	6.0	16.0	13.5	8.5	10.5	18.0
1991	18.5	13.0	9.5	16.0	7.0	1.3	3.4	IP	15.0	6.0	7.0	2.8	8.3	18.5
1992	13.0	4.0	3.0	9.5	7.6	8.5	2.7	24.5	11.0	16.0	2.6	16.0	9.9	24.5
1993	1.0	2.5	13.3	3.8	18.5	13.0	IP	8.0	12.5	76.0	8.5	4.5	13.5	76.0
1994	11.5	18.0	2.3	8.5	35.3	11.5	8.5	1.6	2.9	22.0	19.0	20.0	13.4	35.3
1995	15.5	32.0	-----	19.0	9.0	29.0	6.5	4.4	13.0	6.0	12.0	12.2	14.4	32.0
1996	15.6	16.0	21.0	16.0	16.0	IP	26.0	IP	20.0	5.0	10.5	36.0	15.2	36.0
1997	11.0	3.5	0.0	20.0	17.5	13.0	23.5	17.2	28.5	20.0	51.0	25.5	19.2	51.0
1998	20.0	8.3	5.5	11.0	16.7	8.0	1.7	10.5	7.5	5.5	21.0	18.0	11.1	21.0
1999	23.0	10.0	5.5	8.0	9.5	14.5	9.0	5.0	10.0	20.5	3.5	-----	10.8	23.0
2000	-----	0.5	12.0	9.5	16.0	5.5	6.5	8.0	7.0	15.0	15.0	17.0	10.2	17.0
2001	28.0	12.5	12.0	3.5	7.5	8.5	17.5	10.0	9.0	13.5	2.0	5.0	10.8	28.0
2002	14.0	9.0	11.5	12.0	15.0	10.0	11.0	18.5	10.0	22.5	19.5	9.0	13.5	22.5

ANEXO 2.4.1. DATOS CLIMÁTICOS

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

M.A.P.A. SISTEMA DE GESTION DE BASES CLIMATICAS 2502PLU-.PLU Fecha: 19/11/03
I.R.Y.D.A. LISTADO DE DATOS PLUVIOMETRICOS (DATPREC.DBF) Hora: 10:48:51
Página: 4
Días de lluvia TIPO DE DATO: 01 UNIDAD: días SERIE: 1967-2002
INDICATIVO: 2502 DENOMINACION: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
LATITUD: 41°09'25" N LONGITUD: 04°34'17" W ALTITUD: 820 m ALTURA ANEMOMETRO: -- m

AÑO	-----DATOS DEL OBSERVATORIO-----												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCTUBRE	NOV.	DIC.	TOT.AÑO
1967	8	5	5	12	9	5	2	4	2	6	9	--	67
1968	--	16	4	8	9	1	2	3	4	6	6	9	68
1969	7	5	13	7	7	7	2	1	15	6	9	3	82
1970	16	3	5	3	10	9	2	2	2	3	13	2	70
1971	9	2	7	18	18	15	6	1	2	6	6	4	94
1972	4	11	5	5	7	7	3	2	10	19	11	4	88
1973	9	4	3	4	12	7	5	2	2	5	5	4	62
1974	12	5	10	11	3	4	3	2	3	4	7	2	66
1975	5	6	8	11	13	11	1	7	8	4	5	7	86
1976	1	9	5	9	5	7	6	4	7	16	8	11	88
1977	13	16	8	4	10	10	9	3	2	8	5	10	98
1978	3	9	7	8	10	11	1	1	3	1	4	12	70
1979	9	12	12	6	4	3	4	1	4	13	4	5	77
1980	4	4	1	9	6	3	3	4	3	5	7	5	54
1981	0	8	9	9	8	2	4	4	3	2	0	15	64
1982	7	6	1	5	7	7	4	2	7	6	5	10	67
1983	3	6	3	8	7	5	4	4	--	4	12	6	62
1984	12	4	8	8	17	7	1	2	1	10	16	8	94
1985	12	11	7	9	10	6	2	0	4	1	10	7	79
1986	5	15	7	9	6	1	2	2	8	10	5	6	76
1987	6	10	6	11	5	7	13	5	4	14	7	10	98
1988	--	3	4	18	16	17	5	3	2	8	6	3	85
1989	2	10	4	15	15	7	7	8	4	4	16	18	110
1990	6	6	4	10	10	8	6	4	4	15	9	6	88
1991	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1992	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1993	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1994	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1995	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1996	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1997	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
1998	--	--	--	--	--	--	--	--	--	3	7	6	16
1999	2	5	6	9	9	1	3	5	9	15	4	--	68
2000	--	2	6	25	14	1	3	3	5	6	17	18	100
2001	16	3	19	1	7	1	8	5	5	9	3	2	79
2002	10	5	10	7	12	4	3	3	8	10	18	14	104

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

LISTADO DEL BALANCE HÍDRICO

INDICATIVO ESTACIÓN DAT. PRECIPITACIÓN : 2502 SERIE PRECIPITACIÓN : 1967-2002
 DENOMINACIÓN: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
 LATITUD: 41°09'25''N LONGITUD: 04°34'17''W ALTURA: 820m ALTURA ANEMOMETRO: --m

INDICATIVO ESTACIÓN DAT. ETO : 2502 SERIE Eto : 1987-2002
 DENOMINACIÓN: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
 LATITUD: 41°09'25''N LONGITUD: 04°34'17''W ALTURA: 820m ALTURA ANEMOMETRO: --m

RESERVA MÁXIMA : 40 mm.

Eto : PENMAN-MONTEITH

DATO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT. ANUAL
MÉTODO DIRECTO:													
P	41.8	37.0	32.5	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	47.3	439.1
EtoPM	36.3	52.0	91.3	108.1	154.6	193.6	206.2	186.1	129.6	79.6	43.1	31.8	1312.3
P-ETP	5.5	-15.0	-58.8	-60.4	-101.1	-162.7	-184.7	-172.6	-103.4	-37.5	1.9	15.5	-873.2
R	22.9	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	17.4	
VR	5.5	-15.0	-8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	15.5	
ETR	36.3	52.0	40.4	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	43.1	31.8	439.1
F	0.0	0.0	50.9	60.4	101.1	162.7	184.7	172.6	103.4	37.5	0.0	0.0	873.2
Ex	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

MÉTODO EXPONENCIAL:													
P	41.8	37.0	32.5	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	47.3	439.1
EtoPM	36.3	52.0	91.3	108.1	154.6	193.6	206.2	186.1	129.6	79.6	43.1	31.8	1312.3
P-ETP	5.5	-15.0	-58.8	-60.4	-101.1	-162.7	-184.7	-172.6	-103.4	-37.5	1.9	15.5	-873.2
PPA	22.3	37.2	96.1	156.5	257.6	420.2	604.9	777.5	880.9	918.4	0.0	0.0	
R	22.9	15.8	3.6	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	17.4	
VR	5.5	-7.2	-12.2	-2.8	-0.7	-0.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	1.9	15.5	
ETR	36.3	44.2	44.6	50.5	54.2	31.0	21.5	13.5	26.2	42.1	43.1	31.8	439.1
F	0.0	7.8	46.7	57.6	100.4	162.6	184.7	172.6	103.4	37.5	0.0	0.0	873.2
Ex	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

LISTADO DEL BALANCE HÍDRICO

INDICATIVO ESTACIÓN DAT. PRECIPITACIÓN : 2502 SERIE PRECIPITACIÓN : 1967-2002
 DENOMINACIÓN: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
 LATITUD: 41°09'25''N LONGITUD: 04°34'17''W ALTURA: 820m ALTURA ANEMOMETRO: --m

INDICATIVO ESTACIÓN DAT. ETO : 2502 SERIE Eto : 1987-2002
 DENOMINACIÓN: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
 LATITUD: 41°09'25''N LONGITUD: 04°34'17''W ALTURA: 820m ALTURA ANEMOMETRO: --m

RESERVA MÁXIMA : 40 mm.

Eto : THORNTHWAITE

DATO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT. ANUAL
MÉTODO DIRECTO:													
P	41.8	37.0	32.5	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	47.3	439.1
EtoTH	10.0	16.1	33.1	39.3	76.3	107.0	135.8	126.4	80.3	47.7	21.5	12.5	706.0
P-ETP	31.8	20.9	-0.6	8.4	-22.8	-76.1	-114.3	-112.9	-54.1	-5.6	23.5	34.8	-266.9
R	40.0	40.0	39.4	40.0	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5	40.0	
VR	0.0	0.0	-0.6	0.6	-22.8	-17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5	16.5	
ETR	10.0	16.1	33.1	39.3	76.3	48.1	21.5	13.5	26.2	42.1	21.5	12.5	360.3
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.9	114.3	112.9	54.1	5.6	0.0	0.0	345.7
Ex	31.8	20.9	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.3	78.8
D	20.5	20.7	10.4	9.0	4.5	2.3	1.1	0.6	0.3	0.0	0.0	9.2	

MÉTODO EXPONENCIAL:													
P	41.8	37.0	32.5	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	47.3	439.1
EtoTH	10.0	16.1	33.1	39.3	76.3	107.0	135.8	126.4	80.3	47.7	21.5	12.5	706.0
P-ETP	31.8	20.9	-0.6	8.4	-22.8	-76.1	-114.3	-112.9	-54.1	-5.6	23.5	34.8	-266.9
PPA	0.0	0.0	0.6	0.0	22.8	98.9	213.1	326.0	380.1	385.7	0.0	0.0	
R	90.1	79.3	39.4	47.7	22.6	3.4	0.2	0.0	0.0	0.0	23.5	58.3	
VR	31.8	-10.9	-39.9	8.4	-25.1	-19.2	-3.2	-0.2	-0.0	-0.0	23.5	34.8	
ETR	10.0	16.1	72.4	39.3	78.6	50.2	24.7	13.7	26.2	42.1	21.5	12.5	407.3
F	0.0	0.0	-39.3	0.0	-2.3	56.8	111.1	112.7	54.1	5.6	0.0	0.0	298.7
Ex	0.0	31.8	39.3	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.4
D	0.0	15.9	27.6	13.8	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

LISTADO DEL BALANCE HÍDRICO

INDICATIVO ESTACIÓN DAT. PRECIPITACIÓN : 2502 SERIE PRECIPITACIÓN : 1967-2002
 DENOMINACIÓN: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
 LATITUD: 41°09'25''N LONGITUD: 04°34'17''W ALTURA: 820m ALTURA ANEMOMETRO: --m

INDICATIVO ESTACIÓN DAT. ETO : 2502 SERIE Eto : 1987-2002
 DENOMINACIÓN: SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA PROVINCIA: SEGOVIA TIPO: TERMOPLUVIO
 LATITUD: 41°09'25''N LONGITUD: 04°34'17''W ALTURA: 820m ALTURA ANEMOMETRO: --m

RESERVA MÁXIMA : 40 mm.

Eto : HARGREAVES

DATO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOT. ANUAL
MÉTODO DIRECTO:													
P	41.8	37.0	32.5	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	47.3	439.1
EtoHA	36.6	52.4	94.9	114.3	165.9	207.9	223.5	201.1	134.8	82.1	46.4	34.4	1394.3
P-ETP	5.2	-15.4	-62.4	-66.6	-112.4	-177.0	-202.0	-187.6	-108.6	-40.0	-1.4	12.9	-955.2
R	18.1	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.9	
VR	5.2	-15.4	-2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.9	
ETR	36.6	52.4	35.2	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	34.4	439.1
F	0.0	0.0	59.7	66.6	112.4	177.0	202.0	187.6	108.6	40.0	1.4	0.0	955.2
Ex	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

MÉTODO EXPONENCIAL:													
P	41.8	37.0	32.5	47.7	53.5	30.9	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	47.3	439.1
EtoHA	36.6	52.4	94.9	114.3	165.9	207.9	223.5	201.1	134.8	82.1	46.4	34.4	1394.3
P-ETP	5.2	-15.4	-62.4	-66.6	-112.4	-177.0	-202.0	-187.6	-108.6	-40.0	-1.4	12.9	-955.2
PPA	31.7	47.1	109.5	176.2	288.6	465.5	667.5	855.1	963.7	1003.7	1005.0	0.0	
R	18.1	12.3	2.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.9	
VR	5.2	-5.8	-9.7	-2.1	-0.5	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	12.9	
ETR	36.6	42.8	42.2	49.8	54.0	31.0	21.5	13.5	26.2	42.1	45.0	34.4	439.1
F	0.0	9.6	52.7	64.5	111.9	176.9	202.0	187.6	108.6	40.0	1.4	0.0	955.2
Ex	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

ANEXO 2.4.2. BALANCE HÍDRICO

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA



CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Nº f	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	NE. (msnm)	fecha	USO	Litol	C. (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES	Q (l/sg)	NAT	fecha	toponimia/observaciones	FUENTE
1	365526	4572570	752,9	P	8,30	7.07d	102,00	n.d.	Jun-99	R	DETR	1090	8,20	15,0	30	Jun-99	-		P			MAPA
2	365722	4572090	757,2	P	7,4	6,03	60	753,57	Jun-99	R	DETR	832	7,95	17	37	Jun-99	-		P			MAPA
3	365796	4572020	754,8	P	5,18	4,91	51	754,60	Jun-99	C	DETR	855	8	17,5	35	Jun-99	-		P		RCP 1-03	MAPA
4	365972	4571980	760,4	P-S	6.20/11.8	7	80	752,80	Jun-99	C	DETR	1250	7,8	17	37	Jun-99	-		P-S			MAPA
5	366002	4571760	758,6	P-S	7.00/ n.d.	5,48	70	751,22	Jun-99	R	DETR	870	8,1	18	35	Jun-99	Bi-Mg-Ca		P-S		RCH 1-03	MAPA
6	364460	4571610	755,0	CH	1	0,5	-50	757,00	Jun-99	C	DETR	12000	9	22	30	Jun-99	-		CH		Charca salina	MAPA
7	366030	4571535	757,8	P	16,7	12,6	-300	741,40	Jun-99	R	DETR	500	8,1	19	37	Jun-99	-		P		RCP 2-03	MAPA
8	366053	4571420	757,4	P	7,63	6,05	80	752,75	Jun-99	C	DETR	821	9,2	16	32	Jun-99	-		P			MAPA
9	366546	4571316	757,3	P	5,3	4,72	60	752,88	Jun-99	R	DETR	929	7,8	20	34	Jun-99	-		P		RCP 3-03	MAPA
10	366204	4571310	756,8	P	8,8	6,7	60	749,90	Jun-99	C	DETR	835	8,15	17	35	Jun-99	-		P			MAPA
11	364187	4571290	759,1	P	3,51	1,13	-45	760,42	Jun-99	R	DETR	768	8,9	19	27	Jun-99	-		P			MAPA
12	366474	4571260	758,2	P	6	5,55	40	751,85	Jun-99	C	DETR	1020	8,3	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
13	368985	4570423	740,7	M	0	0,00	0	740,72	ene-04	O	DETR					ene-04			M		Manantial de Villeguillo (seco).	MAPA
14	366286	4571190	757,6	P	8,2	5,3	52	751,22	Jun-99	C	DETR	728	8,4	17	35	Jun-99	-		P			MAPA
15	366340	4570310	762,6	P	4,8	3.15d	35	n.d.	Jun-99	R	DETR	762	7,9	19	30	Jun-99	-		P			MAPA
16	366215	4570227	763,8	P	7	2,9	70	760,80	Jun-99	C	DETR	820	7,9	19	31	Jun-99	-		P		RCP 4-03	MAPA
17	364383	4570220	778,5	P	2,55	1,6	0	780,40	Jun-99	R	DETR	1050	8,2	17	24	Jun-99	-		P			MAPA
18	365108	4570210	765,1	S	>150	n.d.	0	n.d.	Jun-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		S		Sondeo sellado, sin muestrear.	MAPA
19	365442	4570210	761,5	CH	1,5	0,5	50	764,00	Jun-99	C	DETR	1560	8,4	23	30	Jun-99	-		CH			MAPA
20	367419	4570177	764,6	Pi	29,39	5,5	0,06	757,56	Feb-03	I	DETR	755	8,6	n/a	n/a	1/13/03			Pi		RCP 5-03 MEDIDO PVC EXTERNO	MAPA
21	366255	4570150	764,1	P	5	2,9	70	764,80	Jun-99	C	DETR	617	8,1	19	30	Jun-99	-		P			MAPA
22	366306	4570150	763,4	P	4,9	3,2	130	765,10	Jun-99	C	DETR	617	8,1	19	30	Jun-99	-		P			MAPA
23	366089	4570140	764,5	P	4,8	4,6	0	762,40	Jun-99	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		P		Sin muestrear, mucha vegetación	MAPA
24	364764	4570080	779,4	S	240	n.d.	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		S		Sondeo cerrado, sin muestrear.	MAPA
25	364413	4570070	776,7	CH	1	0,5	0	781,50	Jun-99	C	DETR	1785	8,4	21	25	Jun-99	-		CH			MAPA
26	367642	4569970	765,3	P	13	4,6	-200	760,40	Jun-99	R	DETR	840	7,8	20	36	Jun-99	-		P			MAPA
27	367946	4569960	765,9	P	7,7	7,3	70	759,40	Jun-99	C	DETR	1070	8,4	21	31	Jun-99	-		P			MAPA
28	366130	4569930	766,7	S	150	70-80*	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		S		Datos verbales	MAPA
29	366502	4569660	765,8	P	7,65	2,9	50	765,60	Jun-99	R	DETR	763	8,1	17	35	Jun-99	-		P			MAPA
30	366758	4569620	766,1	P	9,1	7.6d	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	620	8,5	21	36	Jun-99	Su-Ni-Mg-Ca		P		RCH 2-03	MAPA
31	366484	4569570	763,9	P	15	3,6	70	765,10	Jun-99	C	DETR	980	9,3	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
32	366911	4569534	765,7	P	8	5	100	761,00	Jun-99	C	DETR	820	8,5	17	35	Jun-99	-		P		RCP 6-03	MAPA
33	367924	4569398	767,9	S	100	n.d.	0	n.d.	Jun-99	O	DETR	840	7,6	19	33	Jul-99	Bi-Na		S			MAPA
34	367529	4569305	766,2	Pi	40	6,32		759,83	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 7-03	MAPA
35	367247	4569220	766,6	P	7,8	6,4	120	762,80	Jun-99	C	DETR	865	8,7	21	36	Jun-99	-		P			MAPA
36	367139	4569181	766,1	P	6,8	5,7	20	760,50	Jun-99	C	DETR	787	8	20	37	Jun-99	-		P			MAPA
37	367181	4569157	767,83	S	25														S		minisondeo 2003	MAPA
38	367429	4569080	766,8	P	7,7	6,8	20	761,40	Jun-99	C	DETR	980	8,9	22	38	Jun-99	-		P			MAPA
39	367331	4568927	769,0	S prof	>100		0												S prof		RCP 8-03 sondeo prof abandonado	MAPA
40	367571	4568880	767,4	P	26	9.90d	70	n.d.	Jun-99	R	DETR	890	8,1	18	34	Jun-99	-		P			MAPA
41	368610	4568860	768,5	P	26	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P			MAPA
42	367092	4568840	777,0	CH	1,5	0,5	-200	772,50	Jun-99	C	DETR	1945	7,8	24	30	Jun-99	-		CH			MAPA
43	367436	4568801	768,1	P-S	5.5/n.d.	5,5	100	763,50	Jun-99	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		P-S		RCP 9-03	MAPA
44	367170	4568780	775,7	P	1,7	1,3	-200	771,70	Jun-99	C	DETR	920	7,8	21	30	Jun-99	-		P			MAPA
45	367422	4568720	769,7	P	10,8	10	70	759,70	Jun-99	C	DETR	960	8,3	21	30	Jun-99	-		P			MAPA
46	367497	4568620	769,8	P-S	7.7/n.d.	8,75	30	760,55	Jun-99	C	DETR	1010	8,1	19	27	Jun-99	-		P-S			MAPA
47	367760	4568580	768,5	S	24	9.10d	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	770	7,8	19	30	Jun-99	-		S			MAPA
48	367666	4568430	769,3	P-S	1.5/n.d.	n.d.	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		P-S		Sondeo cerrado, sin muestrear.	MAPA
49	367507	4568390	770,3	P	12,3	11,3	90	758,60	Jun-99	C	DETR	1080	8,2	17	30	Jun-99	-		P		RCH 3-03	MAPA
50	367503	4568300	770,3	S	n.d.	11.30d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	1200	7,85	20	36	Jul-99	Bi-Su-Mg-Ca		S			MAPA
51	367514	4568250	770,2	P	12,2	11,4	130	758,90	Jun-99	C	DETR	1540	8	17	25	Jun-99	-		P			MAPA
52	368221	4568154	768,8	S	11,20/n.d.	9,2	0	758,80	Aug-99	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Aug-99	-		S			MAPA
53	368060	4568100	769,9	S					30/07/2003		DETR								S		Nuevo sondeo Villeguillo.	MAPA
54	368057	4568081	769,9	S					jul-03	R	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	jul-03			S			MAPA
55	368352	4568050	770,7	S	10/n.d.	11.41d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S			MAPA
56	368074	4568022	770,1	Pi	18	7,7	21	760,88	Feb-03	I	DETR	741	7,05	11,5	14	Jun-02			Pi		RCP 10-03 Tsd=54 ppm	MAPA
57	368686	4567906	771,1	Pi	21	5.31*		765,8	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 11-03	MAPA

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

Nº f	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	NE. (msnm)	fecha	USO	Litol	C. (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES	Q (l/sg)	NAT	fecha	toponimia/observaciones	FUENTE	
58	367792	4567790	770,7	P-S	12.65/n.d.	10,22	96	762,74	Jul-99	C	DETR	800	8,3	18	34	Jul-99	-		P-S				MAPA
59	368025	4567787	770,6	S					30/07/2003	A	DETR								S			Nuevo sondeo Villeguillo	MAPA
60	367601	4567695	771,3	S	n.d.	10,6	27	760,67	Jul-99	R	DETR	500	8,8	18	36	Jul-99	-		S			RCP 12-03	MAPA
61	368855	4567680	770,2	P	24,3	11,4	24	758,84	Jul-99	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P				MAPA
62	367847	4567640	771,3	P	10,5	8,75	80	764,05	Jul-99	C	DETR	850	8,2	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P				MAPA
63	369163	4567640	772,0	S	270	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	510	8,4	22	34	Jul-99	Bi-Na-Ca		S			Mezcla con eponita.	MAPA
64	369048	4567630	772,1	S	30	11,1	0	763,90	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.		Jul-99	-		S				MAPA
65	367637	4567610	773,1	P	12,8	11,55	73	764,18	Jul-99	C	DETR	1200	8,15	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P				MAPA
66	369527	4567430	772,4	S	190	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S			RCR 39-03	MAPA
67	367914	4567270	774,1	S	n.d.	11d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	400	9,1	16	34	Jul-99	Bi-Na		S				MAPA
68	368845	4567200	773,0	P	n.d.	10,65	0	764,35	Jul-99	C	DETR	900	8,1	16	26	Jul-99	-		P				MAPA
69	368845	4567200	772,8	P	N/A	n/a	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P			rezume camino cacera Betaya	PROPIO
70	369753	4567100	772,9	S	>100	49,71	30	722,59	Jul-99	C	DETR	520	8,1	20	34	Jul-99	Bi-Na		S			RCP 13-03 RCH 6-03.	MAPA
71	369959	4567090	773,6	Pi	35,0	21,54	n.d.	n.d.	04/06/2003	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		Pi			RCH 4-03 Piezometro RCP 14-03 red control nitratos	MAPA
72	368948	4567013	773,8	S					jul-03	R	DETR	693	7,49	18	35	jul-03			S				MAPA
73	368948	4567013	773,8	S	?	n/a	0	n/a	23-Jul-03	R	DETR	693	7,49	18	35	23-Jul-03			S			PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
74	369069	4566920	774,1	P	9,1	7,7	-200	760,30	Jul-99	C	DETR	980	8,2	16	27	Jul-99	-		P				MAPA
75	369069	4566920	776,1	P	N/A	n/a	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P			PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
76	368629	4566865	773,3	S		6,12			04/06/2003	R	DETR	679	7,70	18	36	jul-03			S			RCP 15-03 RCR 38-03	MAPA
77	368629	4566865	773,3	S	?	n/a	0	n/a	23-Jul-03	R	DETR	679	7,7	18	36	23-Jul-03			S			PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
78	368421	4566857	773,1	P	12	5,06	0	768,0	23-Jul-03	O	DETR	1323	8,07	21	36	23-Jul-03			P			PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
79	368164	4566810	773,7	P-S	n.d.	7,5	-200	766,50	Jul-99	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P-S				MAPA
80	368448	4566810	773,0	P	12	8,52	-34	763,14	Jul-99	C	DETR	1400	8,1	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P				MAPA
81	368604	4566501	772,6	S	17	8,82	20	763,38	Jul-99	R	DETR	1000	8,05	18	34	Jul-99	Bi-Su-Mg-Ca		S			RCP 16-03	MAPA
82	368293	4566460	776,1	P	14,4	10,55	56	765,01	Jul-99	C	DETR	1200	7,9	18	30	Jul-99	-		P				MAPA
83	368656	4566330	775,0	P	10,5	8,9	0	766,10	Jul-99	C	DETR	1370	7,9	16	34	Jul-99	-		P				MAPA
84	369306	4566315	776,6	Pi	20,57	11,13	0,14	767,71	Feb-03	I	DETR	1090	7,5	12	4,3	1/13/03			Pi			RCH 5-03 RCP 17-03 MEDIDO PVC INTERNO	MAPA
85	368722	4566285	775,2	P	7,5	5,82	0	769,4	23-Jul-03	O	DETR	556	9,49	23	37	23-Jul-03			P			PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
86	368737	4566190	775,5	P-S	10,6	6,95	-197	761,08	Jul-99	C	DETR	1400	7,95	16	33	Jul-99	-		P-S				MAPA
87	368737	4566190	770	P	11	n/a	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P				PROPIO
88	368883	4566020	775,7	P	N/A	N/A	N/A	N/A	24-Mar-03	C	DETR								P				MAPA
89	368670	4565940	776,4	S	18	11.3d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	840	8	17	34	Jul-99	Bi-Su-Mg-Ca		S				MAPA
90	368850	4565882	776,2	P	seco	seco	1,2	seco	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P			pozo junto al CAZ, no llega el agua RCR 37-03	MAPA
91	368870	4565798	776,4	P	7,76	7,76	1,1	6,66	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P			descuelgue a 5m y 7.76 ND RCR 36-03	MAPA
92	368629	4565730	777,0	S	n.d.	10,02	0	765,98	Jul-99	R	DETR	1400	8	17	35	Jul-99	-		S				MAPA
93	370865	4565679	775,3	M	0													SECO	M	23/07/2003	Manantial de la Casa de los Médicos o "de los Oviedos".	MAPA	
94	368926	4565642	776,5	Pi	20	1,55	0	773,45	Feb-03	I	DETR	1010	7	9,7	13	Jun-02			Pi			RCP 18-03 RCH 26-03 RCR 35-03	MAPA
95	371870	4565615	754,8	S	5,7	3,7	0	751,1	23-Jul-03	D	DETR	782	7,75	18	34	23-Jul-03			S			PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
96	368663	4565590	777,0	P-S	10,8	10,05	0	764,95	Jul-99	C	DETR	1200	8,1	17	35	Jul-99	-		P-S				MAPA
97	367731	4565550	793,6	P-CH	n.d.	2,2	0	792,80	Jul-99	C	DETR	4300	9,2	22	32	Jul-99	-		P-CH				MAPA
98	368696	4565440	777,3	P-S	13,1	9,6	-50	764,90	Jul-99	C	DETR	900	8,1	18	35	Jul-99	-		P-S				MAPA
99	368912	4565390	777,0	P-S	12	9,6	0	770,40	Jul-99	C	DETR	1100	8,1	17	37	Jul-99	-		P-S				MAPA
100	368629	4565382	778,1	Pi	25	9,38	60	768,75	18/07/2003	I	DETR								Pi			RCP 19-03	MAPA
101	367302	4565377	793,6	P	4,05	2,33	40	791,07	Jul-99	C	DETR	1870	8,1	17	30	Jul-99	Bi-Su-Mg-Ca		P			RCH 8-03	MAPA
102	368710	4565350	777,5	P-S	13,1	10,52	-50	763,98	Jul-99	C	DETR	1200	8,2	17	37	Jul-99	-		P-S				MAPA
103	369166	4565346	773,9	P	7,6	6,69	-230	764,01	Jul-99	R	DETR	1400	8,25	17	32	Jul-99	-		P			RCR 34-03	MAPA
104	369787	4565325	778,5	Pi	20,6	11,68	0,08	769,26	Feb-03	I	DETR	610	7,8	n/a	n/a	1/13/03			Pi			RCP 20-03 MEDIDO PVC INTERNO	MAPA
105	368771	4565280	777,5	P	n.d.	11.0d	-310	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P				MAPA
106	372230	4565220	770	S	110	N/A	0	N/A	N/A	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			S			AZAFRANALES-CONVENTO. PERFIL HIDROQUIMICO	CHD
107	372380	4564760	780	S	130	N/A	0	N/A	N/A	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			S			CAMINO LAS ERILLAS. PERFIL HIDROQUIMICO	CHD
108	372290	4563850	788	P	5	N/A	0	N/A	N/A	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P				

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

Nº f	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	NE. (msnm)	fecha	USO	Litol	C. (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES	Q (l/sg)	NAT	fecha	toponimia/observaciones	FUENTE
117	372364	4564746	757,6	M	0	0	0	757,6	23-Jul-03	O	DETR	282,6	6,91	20	34,2	23-Jul-03		0,3	M	23/07/2003	PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
118	370037	4564627	780,0	Pi	20	13,21	0,17	766,31	Feb-03	I	DETR	310	7,5	n/a	n/a	1/13/03			Pi		RCP 21-03 MEDIDO PVC INTERNO	MAPA
119	369188	4564550	779,4	S	30		0	775,00	Jul-99	R	DETR	1100	9,6	15	36	Jul-99	Bi-Su-Mg-Ca		S		RCR 31-03	MAPA
120	368917	4564510	780,6	P-S	9/n.d.	8,79	-210	764,11	Jul-99	C	DETR	1200	n.d.	16	36	Jul-99	-		P-S		RCH 9-03	MAPA
121	371224	4564445	782,2	Pi	12	4,6		777,57	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 22-03	MAPA
122	368958	4564189	782,0	Pi	15	10,2		771,76	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 23-03	MAPA
123	369200	4564180	780,7	P-S	7/n.d.	15.64d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P-S			MAPA
124	369410	4563840	779,9	S	100		10	779,10	Jul-99	O	DETR	450	9,6	18	36	Jul-99	-		S		RCP 24-03	MAPA
125	369332	4563700	781,8	S	n.d.	13.10d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S			MAPA
126	369157	4563670	782,6	P-S	10/13.0	11,58	-30	763,12	Jul-99	C	DETR	1010	10	14	36	Jul-99	-		P-S			MAPA
127	369551	4563660	782,2	S	200	72d	9	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		RCR 30-03	MAPA
128	369551	4563660	778	S	200	n/a	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			S		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
129	369626	4563622	782,0	Pi	23	1,93	20	777,72	Feb-03	I	DETR	940	7,1	13	13	Jun-02			Pi		RCP 25-03 RCH 27-03 RCR 29-03	MAPA
130	369265	4563530	782,9	S	130	12.93d/13.5d	20	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		2ª medida el 05/8/99.	MAPA
131	369125	4563515	781,1	S	130		0	781,00	Jul-99	R	DETR	1093	9,44	18	34	Jul-99	Bi-Cl-Mg-Ca		S		RCP 26-03	MAPA
132	369440	4563470	782,4	P	n.d.	11	0	764,00	Jul-99	R	DETR	1090	9,2	14	34	Jul-99	-		P		RCR 28-03	MAPA
133	369440	4563470	775	P	N/A	n/a	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
134	369261	4563440	784,2	P-S	6.6/12.4	11,48	27	766,79	Jul-99	C	DETR	872	9,3	18	34	Jul-99	-		P-S			MAPA
135	369694	4563335	783,8	Pi	13	3,94	28	779,9	12/07/2003	I	DETR								Pi		RCP 27-03 RCR 27-03	MAPA
136	372322	4563291	774,9	P	4,2	2,51	0	772,4	23-Jul-03	D	DETR	528	7,29	18	33	23-Jul-03			P		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
137	369549	4563127	783,6	P	9,7	9,7	0	9,7	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 26-03 antiguo 88-minisondeo	MAPA
138	369540	4563116	783,7	P	7,18	7,18	-3	10,18	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 25-03 pozo-sodeo	MAPA
139	369546	4563107	783,7	P	?	n/a	0	n/a	23-Jul-03	R	DETR	460	7,89	19,1	35	23-Jul-03			P		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
140	369630	4563100	779	P	13 M	N/A	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P		PERFIL HIDROQUIMICO	CHD
141	369454	4563073	782,6	S	22		15	782,15	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	ene-00	-		S		RCP 29-03	MAPA
142	369454	4563073	784,1	S	22	n/a	0	754,1	23-Jul-03	R	DETR	793	7,92	18	35	23-Jul-03			S		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
143	369477	4563040	782	P	N/A	n/a	0	n/a	n/a	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			P		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
144	369495	4563034	784,2	S	n.d.	12.98d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	900	9,3	16	36	Jul-99	-		S		RCR 24-03	MAPA
145	369518	4562990	784,2	P-S	8.3/12.2	11,85	60	768,75	Jul-99	C	DETR	900	9,2	16	35	Jul-99	-		P-S		POZO JUNTO AVE INVENTARIADO Y RCH 03	MAPA
146	369567	4562873	784,7	P	60,3	60,3	0	60,3	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 23-03 sondeo profundo	MAPA
147	369575	4562780	785,0	S	n.d.	57.31d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		RCR 22-03	MAPA
148	370783	4562750	784,4	S	28	22,5	30	761,80	Jul-99	R	DETR	600	8,5	21	33	Jul-99	-		S		RCH 10-03	MAPA
149	369376	4562690	784,9	S	30	13.7d/12.08*	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	800	9,3	16	35	Jul-99	-		S		RCP 30-03 Medida tomada el 06/8/99.	MAPA
150	369180	4562570	784,8	S	n.d.	12.83d	5	n.d.	Jul-99	R	DETR	990	9,2	17	31	Jul-99	-		S			MAPA
151	369251	4562570	785,4	P-S	14	11.81d	30	n.d.	Jul-99	R	DETR	900	9,2	17	30	Jul-99	-		P-S			MAPA
152	369278	4562540	785,5	S	n.d.	13.01d	30	n.d.	Jul-99	R	DETR	950	9,2	17	30	Jul-99	-		S			MAPA
153	369365	4562520	785,7	S	n.d.	13.91d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	580	9,23	16	30	Jul-99	-		S			MAPA
154	369373	4562516	784,5	S	27,8		5	784,05	Jul-99	R	DETR	600	9,4	16	30	Jul-99	-		S			MAPA
155	369655	4562513	785,2	Pi	25	22,75			23/07/2003	I	DETR								Pi		RCR 21-03	MAPA
156	369247	4562510	785,5	S	n.d.	23,4	23	756,83	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		Acuifero colgado	MAPA
157	369313	4562496	785,8	P-S	11,95	9,85	-175	768,40	Jul-99	C	DETR	1200	9,38	15	30	Jul-99	-		P-S		RCH 11-03	MAPA
158	369337	4562450	786,6	Pi	21	8,63		777,93	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 31-03	MAPA
159	368915	4562067	789,4	S	110	6.84d	17	n.d.	Jul-99	R	DETR	412	10	15	28	Jul-99	Bi-Na		S		RCP 32-03	MAPA
160	371219	4562067	775,8	M	0													0,2	M	23/07/2003	El Batán- Puente de Hierro	MAPA
161	371261	4562064	762,2	M	0													0,2	M	23/07/2003	El Batán. Descarga cauce	MAPA
162	369312	4562010	787,0	P-S	12,03	8,43	47	772,04	Jul-99	C	DETR	1300	9,52	14	24	Jul-99	-		P-S			MAPA
163	371294	4562006	753,2	M	0	0	0											0,2	M	23/07/2003	puente AVE md	MAPA
164	371280	4561941	757,7	M	0	0	0											0,2	M	23/07/2003	puente AVE md	MAPA
165	371280	4561922	759,8	M	0	0	0											0,2	M	23/07/2003	puente AVE md	MAPA
166	370689	4561876	789,1	Pi	18	13,43		775,72	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 33-03	MAPA
167	370816	4561789	788,6	S	24			788,60		I									S		RCP 34-03	MAPA
168	369247	4561660	788,2	P	10,2	8,8	-120	775,00	Jul-99	C	DETR	1500	9,82	14	22	Jul-99	-		P			MAPA
169	369364	4561611	786,7	S	30	8,77	19	777,42	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	*	Jul-99	-		S		RCR 20-03 No se puede muestrear.	MAPA
170	369296	4561580	788,3	S	n.d.	9.20d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	1200	9,4	16	34	Jul-99	-		S			MAPA
171	369393	4561456	788,6	Pi	18,3	7,99	20	778,43	Feb-03	I	DETR	1230	7	14,5	13	Jun-02			Pi		RCP 35-03 RCR 19-03	MAPA
172	369227	4561430	788,4	S	30	8,72	19	778,47	Jul-99	C	DETR	1000	9,6	14	32	Jul-99	-		S			MAPA
173	372242	4561386	788,8	P		2,88				C	DETR								P		MD VOLTOYA NE 2.88. Dz=0.55 NE=2.33 NMT	MAPA
174	369430	4561340	788,6	P	9	8,1	8	776,98	Jul-99	C	DETR	1500	9	17	34	Jul-99	-		P			MAPA
175	369271	4561276	787,4	S	28	8,69	2	778,33	Jul-99	R	DETR	1190	9,12	17	33	Jul-99	-		S		RCP 36-03	MAPA

ANEXO 2.5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

Nº f	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	NE. (msnm)	fecha	USO	Litol	C. (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES	Q (l/s)	NAT	fecha	toponimia/observaciones	FUENTE
176	369268	4561050	790,0	S	25	9.80d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	1200	9,08	14	34	Jul-99	Bi-Mg-Na		S			MAPA
177	369491	4561050	789,8	P-S	8	4	0	778,00	Jul-99	C	DETR	1200	9,1	15	34	Jul-99	-		P-S			MAPA
178	369214	4561030	790,2	P-S	n.d.	8,6	-280	773,60	Jul-99	C	DETR	1200	9,1	15	33	Jul-99	-		P-S			MAPA
179	369376	4561010	790,1	P-S	12	7,74	78	778,04	Jul-99	C	DETR	2080	8,94	17	33	Jul-99	-		P-S			MAPA
180	369204	4560960	790,7	S	30	9,01	5	776,04	Jul-99	R	DETR	1100	9,15	15	33	Jul-99	-		S			MAPA
181	370648	4560956	791,4	Pi	20,9	17,53	0,09	774,46	Feb-03	I	DETR	600	8,6	12	3	1/13/03			Pi		RCP 37-03. MEDIDO PVC INTERNO. RCH 25-03	MAPA
182	369376	4560940	790,4	P-S	15	8,32	0	773,68	Jul-99	C	DETR	1250	9,1	15	34	Jul-99	-		P-S			MAPA
183	369235	4560910	790,8	S	30	9.77d	20	n.d.	Jul-99	R	DETR	1400	9,2	15	33	Jul-99	-		S			MAPA
184	369377	4560682	790,8	S	18	6,17	29	784,62	06/08/2003	I	DETR								S		RCP 38-03 RCR 18-03	MAPA
185	369052	4560640	791,4	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	1200	9,1	15	33	Jul-99	-		S			MAPA
186	369019	4560590	791,7	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		Sondeo sellado	MAPA
187	369103	4560560	791,3	P	n.d.	n.d.	-10	n.d.	Jul-99	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P		Sin datos	MAPA
188	369031	4560530	791,8	P	13,45	8.82d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	810	9,2	15,5	34	Jul-99	-		P			MAPA
189	369042	4560530	791,8	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	650	9,05	15	34	Jul-99	-		S			MAPA
190	369291	4560515	790,4	P	9,7	8,4	-200	772,60	Jul-99	C	DETR	1100	8,8	23	40	Jul-99	Bi-Mg- Ca		P		RCP 39-03 RCH 13-03.	MAPA
191	368978	4560510	791,9	P	9,97	8,53	43	762,90	Jul-99	R	DETR	920	9,15	15	32	Jul-99	-		P		Agua con signos de contaminación	MAPA
192	368951	4560500	791,9	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	680	9,2	16	32	Jul-99	Bi-Mg- Ca		S			MAPA
193	368948	4560480	792,0	P	11,96	8,5	-170	759,80	Jul-99	C	DETR	880	9	15	32	Jul-99	-		P			MAPA
194	368984	4560480	792,1	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		No se pudo medir	MAPA
195	369103	4560450	792,0	P	13	9	0	776,00	Jul-99	C	DETR	1200	9	21	40	Jul-99	-		P			MAPA
196	370868	4560359	773,6	M	0	0			12/07/2003	O	DETR	818	8,53	17	29	jul-03		0,4	M	23/07/2003	Fuente Fria	MAPA
197	370868	4560359	773,6	M	0	0	0	773,6	23-Jul-03	O	DETR	818	8,53	17?	29	23-Jul-03		0,2	M	23/07/2003	PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
198	368950	4560350	792,6	P	-	P. Seco	-	n.d.	Jul-99	C	DETR	-	-	-	-	Jul-99	-		P		Pozo seco	MAPA
199	370860	4560334	773	M	0	N/A	0	N/A	N/A	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		0,3	M	23/07/2003	Manantial de las Endrinas	PROPIO
200	368950	4560330	792,7	P	11	9,5	-300	774,50	Jul-99	C	DETR	1100	9	19	39	Jul-99	-		P			MAPA
201	368161	4560320	813,0	S	150*	114.75d	115	n.d.	Jul-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		S		Dato verbal profundidad, granja porcina	MAPA
202	369527	4560320	792,1	P	-	P. Seco	-	n.d.	Jul-99	C	DETR	-	-	-	-	Jul-99	-		P		Pozo seco, sin datos	MAPA
203	368956	4560270	792,8	P	17,3	10,3	-300	773,70	Jul-99	R	DETR	1100	8,8	19	39	Jul-99	-		P			MAPA
204	369662	4560253	792,1	Pi	11,54	1,06	0,04	789,78	Feb-03	I	DETR	230	8,9	n/a	n/a	1/13/03			Pi		RCP 40-03 RCR 17-03 MEDIDO PVC INTERNO	MAPA
205	368899	4560200	793,5	P	15,5	11	-200	773,00	Jul-99	C	DETR	1100		19	38	Jul-99	Bi-Ca-Mg		P			MAPA
206	370908	4560120	774	M	0	N/A	0	N/A	N/A	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		0,1	M	23/07/2003	manantial chopera junto caz molino	PROPIO
207	369437	4560090	793,2	P	15	10.0d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	1000	8,6	26	42	Jul-99	-		P			MAPA
208	369152	4560050	793,2	P	9	8,8	0	776,20	Jul-99	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-		P			MAPA
209	369254	4559990	793,6	P	12,5	8,5	60	777,10	Jul-99	C	DETR	1400	8,8	23	35	Jul-99	-		P			MAPA
210	370985	4559961	770,6	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	Rezumes mi Voltoya	MAPA
211	370985	4559961	752	M	0	N/A	0	N/A	N/A	O	DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		0,2	M	23/07/2003	SONDEOS LAS ERILLAS CHD. PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
212	369311	4559940	793,9	P	-	P. Seco	-	n.d.	Jul-99	C	DETR	-	-	-	-	Jul-99	-		P		Pozo seco sin datos	MAPA
213	369689	4559870	793,9	P	14,5	8	-200	777,00	Jul-99	C	DETR	1000	9,1	18	33	Jul-99	-		P			MAPA
214	369594	4559850	793,9	P	12,7	7,8	0	777,20	Jun-99	C	DETR	1000	8,7	18	32	Jun-99	-		P		RCH 21-03	MAPA
215	369597	4559840	793,9	P	8,5	8	-400	773,00	Jun-99	C	DETR	1300	9	20	35	Jun-99	-		P			MAPA
216	369172	4559830	794,0	P	14	9.0d	0	n.d.	Jul-99	R	DETR	1200	8,8	19	34	Jul-99	Bi-Ca-Mg		P			MAPA
217	370391	4559822	792,6	S	>100	41	0	751,00	Jul-99	C	DETR	400	10,2	21	35	Jul-99	-		S		RCP 41-03 RCH 22-03.	MAPA
218	369679	4559800	794,2	P	12	8	0	777,00	Jul-99	C	DETR	1100	9	18	33	Jul-99	-		P			MAPA
219	369470	4559750	794,1	P	15	9.0d	40	n.d.	Jul-99	R	DETR	1100	8,8	17	33	Jul-99	-		P			MAPA
220	369257	4559740	794,3	P	12,5	8	100	778,00	Jun-99	R	DETR	900	9,1	20	36	Jun-99	-		P			MAPA
221	369416	4559730	794,2	P	11,2	8	0	777,00	Jun-99	C	DETR	1000	8,9	20	33	Jun-99	-		P			MAPA
222	369033	4559716	790,9	P	14,2	11.20d	-200	n.d.	Jul-99	R	DETR	1200	8,9	21	37	Jul-99	Bi-Ca-Mg		P		RCP 42-03 RCH 14-03.	MAPA
223	369109	4559710	794,5	P	14,2	9	0	776,00	Jun-99	R	DETR	1100	8,7	21	36	Jun-99	-		P			MAPA
224	369501	4559667	792,8	S	21.0*	21	-200	769,00	Jul-99	R	DETR	1200	8,9	21	37	Jul-99	Bi-Ca-Na		S		Dato prof. Verbal.	MAPA
225	369052	4559660	795,0	P	11	9	0	776,00	Jun-99	C	DETR	1200	8,9	22	36	Jun-99	-		P			MAPA
226	369669	4559590	794,3	P	12,5	9.0d	-200	n.d.	Jun-99	R	DETR	900	8,6	19	36	Jun-99	-		P			MAPA
227	369638	4559500	794,4	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jun-99	R	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		S		Sin muestras	MAPA
228	369598	4559450	794,5	P	14,5	8	0	777,00	Jun-99	R	DETR	900	8,5	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
229	367220	4559418	813,3	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	polo frio O 1. Alto de la Urraca.	MAPA
230	369439	4559390	794,8	P	12,5	8	0	777,00	Jun-99	R	DETR	1200	8,8	18	35	Jun-99	-		P			MAPA
231	369635	4559390	794,5	P	13	8	180	784,80	Jun-99	C	DETR	900	9,1	20	36	Jun-99	-		P			MAPA
232	371103	4559381	767,4	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	Manantial Chopera	MAPA
233	371117	4559375	767,0	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	Fuente camino Ramiron	MAPA
234	368631	4559366	797,8	S	450	66	0	731,00	Jul-99	C	DETR	300	10,7	21	40	Jul-99	-		S		RCP 43-03 Sondeo Coca-1. RCH 23-03.	MAPA

ANEXO 2.5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

Nº f	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	NE. (msnm)	fecha	USO	Litol	C. (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES	Q (l/sg)	NAT	fecha	toponimia/observaciones	FUENTE
235	369254	4559290	795,2	P	12,5	8	0	781,00	Jun-99	C	DETR	1400	9,3	18	35	Jun-99	-		P			MAPA
236	369372	4559290	794,8	P	9	8	20	782,20	Jun-99	R	DETR	1400	8,8	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
237	369308	4559240	795,2	P	11,3	8	0	782,00	Jun-99	R	DETR	1300	8,6	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
238	369500	4559240	795,0	P	12,5	8	40	783,40	Jun-99	R	DETR	1000	8,7	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
239	369628	4559210	795,5	P	10,3	8,1	50	783,40	Jun-99	C	DETR	900	8,9	19	33	Jun-99	-		P			MAPA
240	369732	4559154	795,4	P	N/A	2,84	0	0	2/20/03	C	DETR								P		RCR 16-03	MAPA
241	369732	4559154	797,9	S	8	4	0	793,9	23-Jul-03	R	DETR	872	7,91	18	32	23-Jul-03			S		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
242	369517	4559150	795,3	P	10,5	8,2	30	783,10	Jun-99	R	DETR	1000	8,7	19	35	Jun-99	-		P			MAPA
243	369807	4559143	795,4	P	N/A	2,25	0	0	2/20/03	A	DETR								P		RCR 15-03	MAPA
244	369807	4559143	797,2	P	4,2	3,64	0	793,5	23-Jul-03	R	DETR	760	7,59	17	32	23-Jul-03			P		PERFIL HIDROQUIMICO	PROPIO
245	369475	4559082	795,7	Pi	20,7	7,89	0,08	790,45	Feb-03	I	DETR	1020	8	n/a	n/a	1/13/03			Pi		RCP 44-03 MEDIDO PVC INTERNO	MAPA
246	369858	4559002	796,0	P	N/A	N/A	0,4	0,4	2/20/03	A	DETR								P			MAPA
247	369860	4558955	796,1	P	N/A	1,65	0,5	0,5	2/20/03	A	DETR								P		RCR 14-03	MAPA
248	367579	4558949	814,7	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	polo frio O 2. Fuente de La Hiruela.	MAPA
249	369437	4558940	795,6	S	n.d.	n.d.	0	n.d.	Jun-99	R	DETR	1200	8,6	17	34	Jun-99	-		S			MAPA
250	369358	4558900	796,3	P	20	8	80	784,80	Jun-99	R	DETR	1200	8,7	17	30	Jun-99	-		P			MAPA
251	369254	4558860	796,7	P	12,75	8	100	787,00	Jun-99	R	DETR	1200	8,7	17	30	Jun-99	-		P			MAPA
252	369176	4558850	797,0	P	8,11	8	0	787,00	Jun-99	C	DETR	1200	8,7	18	34	Jun-99	-		P			MAPA
253	369910	4558832	797,1	P	5,6	4,6	50	792,90	Jun-99	C	DETR	900	8,6	20	34	Jun-99	-		P		RCR 13-03	MAPA
254	371073	4558807	777,4	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	Fuente de la Olma	MAPA
255	369549	4558792	795,2	S	21,02	8.6d	30	n.d.	Jun-99	R	DETR	900	8,8	18	30	Jun-99	-		S			MAPA
256	369406	4558730	797,1	P	13,4	8,2	0	786,80	Jun-99	R	DETR	1100	8,2	16	30	Jun-99	-		P			MAPA
257	369520	4558710	797,4	P	10,5	8.7d	-150	n.d.	Jun-99	R	DETR	1300	8,8	17	30	Jun-99	-		P			MAPA
258	369190	4558630	797,6	P	10,8	8,8	20	788,40	Jun-99	C	DETR	1300	8,6	18	30	Jun-99	-		P			MAPA
259	369399	4558630	797,7	P	10,9	8,8	0	788,20	Jun-99	R	DETR	900	8,7	18	30	Jun-99	-		P			MAPA
260	369284	4558590	797,8	P	16	9.6d	0	n.d.	Jun-99	R	DETR	1200	8,6	18	30	Jun-99	-		P			MAPA
261	369979	4558559	798,3	Pi	21	14,66		770,23	12/06/2003	I	DETR								Pi		RCP 28-03	MAPA
262	369223	4558550	797,9	P	19,5	10.10d	40	n.d.	Jun-99	R	DETR	1100	8,5	19	29	Jun-99	-		P			MAPA
263	369965	4558520	798,0	P	4,8	3,6	20	793,60	Jun-99	C	DETR	700	8,1	18	31	Jun-99	-		P			MAPA
264	369339	4558514	798,2	Pi	20	8,92	19	787,32	Feb-03	I	DETR	1230	7	14,4	13	Jun-02			Pi		RCP 45-03 RCH 16-03	MAPA
265	369209	4558512	796,6	P	11,2	9,8	0	786,20	Jun-99	C	DETR	1300	8,7	18	30	Jun-99	Bi-Mg-Ca		P		RCP 46-03 RCH 15-03	MAPA
266	369257	4558500	798,4	P	16	8,7	100	789,30	Jun-99	R	DETR	1100	8,6	19	30	Jun-99	-		P			MAPA
267	369520	4558480	798,5	P	13,6	9	30	787,30	Jun-99	C	DETR	1000	8,6	20	32	Jun-99	-		P			MAPA
268	369981	4558469	798,3	P	5	3,1	0	793,90	Jun-99	C	DETR	800	8,4	18	31	Jun-99	-		P			MAPA
269	369975	4558467	798,3	P	1,49	1,49	0	1,49	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 12-03	MAPA
270	369304	4558460	798,3	P	11,5	9,2	40	788,20	Jun-99	C	DETR	1100	8,6	18	33	Jun-99	-		P			MAPA
271	369493	4558440	798,9	P	7	-	P. Seco	n.d.	Jun-99	O	DETR	-	-	-	-	Jun-99	-		P		Pozo seco y hundido	MAPA
272	369399	4558370	799,1	P	14,6	9.90d	60	n.d.	Jun-99	R	DETR	1200	8,5	17	32	Jun-99	-		P			MAPA
273	369929	4558337	799,4	P	1,98	1,98	0,7	1,28	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 11-03	MAPA
274	371167	4558304	772,7	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	Pozo Molino del Amor md (inyección)	MAPA
275	369480	4558300	799,2	P	13,7	10,3	-300	784,70	Jun-99	C	DETR	1200	8,4	17	33	Jun-99	-		P			MAPA
276	369615	4558280	799,5	P	11,8	10,8	0	786,20	Jun-99	R	DETR	1000	8,4	18	32	Jun-99	-		P			MAPA
277	369439	4558260	799,5	P	10,4	10.20d	20	n.d.	Jun-99	R	DETR	1100	8,7	18	33	Jun-99	-		P			MAPA
278	371113	4558201	771,7	M	0	0												0,1	M	23/07/2003	Molino del Amor-lavadero	MAPA
279	371103	4558195	771,9	M	0	0													S		Sondeo Molino del Amor	MAPA
280	369635	4558180	800,0	P	15,5	10,5	10	787,60	Jun-99	C	DETR	1300	8,4	18	32	Jun-99	-		P			MAPA
281	369527	4558110	800,3	P	13	11.10d	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	1100	8,4	18	33	Jun-99	-		P			MAPA
282	370115	4558015	798,7	P	0,9	0,9	0	0,9	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 10-03	MAPA
283	369547	4558010	800,5	P	10,6	-	P. Seco	n.d.	Jun-99	C	DETR	-	-	-	-	Jun-99	-		P		Pozo seco	MAPA
284	369615	4558010	800,7	P	10,9	10,2	5	787,85	Jun-99	C	DETR	1900	8,6	18	35	Jun-99	-		P			MAPA
285	370182	4558002	798,3	P	1,97	1,97	0,65	1,32	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P		RCR 9-03	MAPA
286	371090	4557986	770,6	M	0	0												0,1	M	23/07/2003	El Granjal	MAPA
287	370063	4557972	798,8	P	N/A	1,81	0,55	0,55	2/20/03	C	DETR								P			MAPA
288	369669	4557970	800,4	P	15,55	10,5	80	789,30	Jun-99	C	DETR	900	8,6	18	35	Jun-99	-		P			MAPA
289	369742	4557952	797,1	P	16,5	12.0d	-200	n.d.	Jun-99	R	DETR	700	8,3	18	35	Jun-99	-		P		RCP 47-03	MAPA
290	371119	4557889	775,9	M	0	0												0,2	M	23/07/2003	Manantial Marote	MAPA
291	369530	4557854	801,3	P	N/A	N/A	0,6	0,6	24-Mar-03	C	DETR								P			MAPA
292	369608	4557850	801,0	P	5	-	P. Seco	n.d.	Jun-99	C	DETR	-	-	-	-	Jun-99	-		P		Pozo seco	MAPA
293	369574	4557820	801,3	P	12,7	10,5	60	792,10	Jun-99	C	DETR	1000	8,5	21	35	Jun-99	-		P			MAPA

ANEXO 2.5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

Nº f	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	NE. (msnm)	fecha	USO	Litol	C. (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES	Q (l/sg)	NAT	fecha	toponimia/observaciones	FUENTE	
294	369750	4557800	801,0	P	16,7	11.4d	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	1000	8,4	20	35	Jun-99	-		P				MAPA
295	369939	4557765	799,8	P	6,77	6,77	1,18	5,59	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P			RCR 6-03	MAPA
296	369961	4557653	799,7	P	6,52	6,52	0,3	6,22	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P			RCR 5-03	MAPA
297	369777	4557600	800,9	P	11	10	50	793,50	Jun-99	C	DETR	1100	8,2	18	37	Jun-99	-		P			RCR 4-03	MAPA
298	369889	4557497	800,8	P	7,3	7,3	0,72	6,58	1/13/03	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-		P			RCR 3-03	MAPA
299	369963	4557462	800,6	P	7	-	P. Seco	n.d.	Jun-99	C	DETR	-	-	-	-	Jun-99	-		P			Pozo seco	MAPA
300	369837	4557330	806,0	P	17	11.7d	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	900	8,4	15	35	Jun-99	Bi-Cl-Mg-Ca		P			RCP 48-03 RCH 17-03	MAPA
301	368902	4557236	806,2	P	9	6,4	100	800,60	Jun-99	R	DETR	900	9,2	19	33	Jun-99	Bi-Mg-Ca		P			RCP 49-03 RCH 18-03.	MAPA
302	367833	4557080	829,0	S	301	n.d.	0	n.d.	Jun-99	R	DETR	300	10,4	23	28	Jun-99	-		S			Agua bombeada	MAPA
303	370474	4556999	802,6	Pi	28,3	19,39	0,07	784,48	Feb-03	I	DETR	-	-	n/a	n/a	1/13/03			Pi			RCP 50-03 RCR 2-03 MEDIDO PVC EXTERNO	MAPA
304	370026	4556930	802,1	P	9,8	n.d.	-300	n.d.	Jun-99	C	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		P			No existe lámina de agua suficiente	MAPA
305	369818	4556890	803,3	P	7,9	7,7	60	798,90	Jun-99	C	DETR	600	8,5	19	33	Jun-99	-		P				MAPA
306	369787	4556876	802,1	P	9,9	7,8	90	795,10	Jun-99	R	DETR	600	8,5	19	33	Jun-99	-		P			RCP 51-03	MAPA
307	370094	4556870	802,2	P	11,6	11	-300	792,00	Jun-99	C	DETR	200	8,4	18	33	Jun-99	-		P				MAPA
308	367509	4556830	830,4	P	6,6	3,7	80	829,10	Jun-99	C	DETR	700	10,5	21	27	Jun-99	-		P				MAPA
309	370124	4556765	802,7	Pi	39,2	10,38	20	789,90	Feb-03	I	DETR	630	6,8	14	13	Jun-02			Pi			RCP 52-03 RCR 1-03	MAPA
310	367474	4556747	830,5	P	5,7	3,5	70	827,20	Jun-99	C	DETR	800	9,9	21	27	Jun-99	-		P				MAPA
311	370188	4556700	803,2	P	16,7	12,2	-300	791,80	Jun-99	R	DETR	300	8,2	19	35	Jun-99	-		P				MAPA
312	368537	4556643	819,8	M	0	0	0	N/A	24-Mar-03	A	DETR	760	7,65			24-Mar-03		0,3	M			Fuente Torrecilla. Polo frio SO.	MAPA
313	370148	4556600	802,7	P	16,5	12.80d	-300	n.d.	Jun-99	R	DETR	600	8,2	18	35	Jun-99	-		P				MAPA
314	367520	4556512	831,4	S	13,9	12,7	-300	815,30	Jun-99	R	DETR	300	8	17	34	Jun-99	Bi-Na-Mg		S				MAPA
315	370357	4556330	804,2	P	16,4	13.20d	-300	n.d.	Jun-99	R	DETR	400	8	20	35	Jun-99	-		P				MAPA
316	370445	4556210	805,2	P	16	13.40d	-400	n.d.	Jun-99	R	DETR	400	8	18	34	Jun-99	-		P				MAPA
317	370566	4556140	804,6	P	13,7	12,2	-300	792,80	Jun-99	C	DETR	500	8,1	19	35	Jun-99	-		P			Pozo en granja de pollos	MAPA
318	370606	4556014	800,9	P	13,9	12,7	-300	784,30	Jun-99	C	DETR	300	8	17	34	Jun-99	Bi-Ni-Ca-Mg		P			RCH 19-03	MAPA
319	367997	4555881	834,1	S	N/A	N/A	N/A	N/A	24-Mar-03	A	DETR								S				MAPA
320	368002	4555865	832,6	P	10,2	7	40	825,40	Jun-99	C	DETR	1000	8,3	16	31	Jun-99	Bi-Ca-Mg		P			RCP 53-03 RCH 20-03.	MAPA
321	367711	4555700	839,9	P	7,8	4,2	80	836,60	Jun-99	C	DETR	700	8,7	19	30	Jun-99	-		P				MAPA
322	367691	4555650	840,5	P	8,4	4,3	0	836,70	Jun-99	R	DETR	700	8,5	15	30	Jun-99	-		P				MAPA
323	368319	4555600	836,6	P	6,2	4,2	0	832,80	Jun-99	R	DETR	800	8,4	18	32	Jun-99	-		P				MAPA
324	367536	4555560	845,9	P	8	6.0d	50	n.d.	Jun-99	R	DETR	800	8,4	18	28	Jun-99	-		P				MAPA
325	368312	4555420	838,9	P	8,5	5.0d	0	n.d.	Jun-99	R	DETR	1200	8,2	21	29	Jun-99	-		P				MAPA
326	368299	4555390	839,9	P	7,4	5,2	0	834,80	Jun-99	C	DETR	1100	8,3	18	29	Jun-99	-		P				MAPA
327	368217	4555380	840,2	P	7,3	5,2	40	837,20	Jun-99	C	DETR	900	8,6	18	32	Jun-99	-		P				MAPA
328	370681	4555060	812,5	S	130	n.d.	0	n.d.	Jun-99	O	DETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jun-99	-		S			Sondeo en caseta cerrada.	MAPA
329	371322	4554656	809	S	>50	14,4	0	794,60	Jun-99	C	DETR	300	8,8	19	31	Jun-99	-		S			RCP 54-03	MAPA
330	371741	4554010	814,0	S	50	17,5	0	800,50	Jun-99	R	DETR	400	8,6	16	31	Jun-99	-		S				MAPA

NATURALEZA:

Manantia M
Sondeo: S
Pozo: P
Charca: CH

ABREVIATURAS EMPLEADAS:

RCP: Red Control Piezometría
RCH: Red control hidroquímica

USOS:

Abastecimiento y Ganadería: A
Desconocido: O
Riego: R
No se usa: C

SIGLAS

n.d.: no determinado
d: nivel dinámico (pozo bombeando durante el muestreo)

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

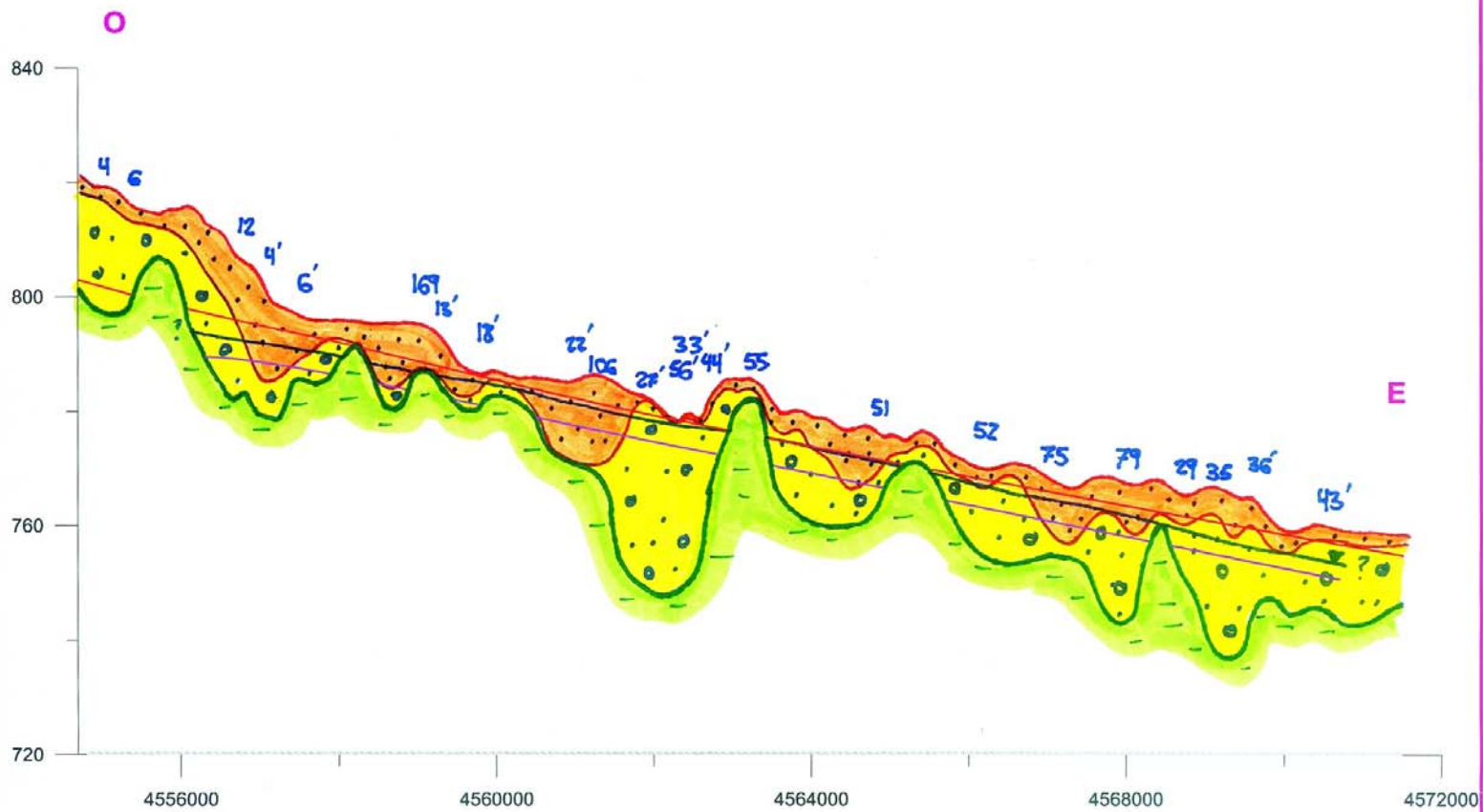
Nº INV	toponimia/observaciones	X	Y	Z	C (uS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	Q (L/S)
M-1	Manantial Villeguillo	368985	4570423	740,7					ene-04	SECO
M-2	Casa de los Oviedos	370865	4565679	775,3					ago-03	SECO
M-3	El Batán- Puente de Hierro	371219	4562067	775,8					jul-03	0,1
M-4	El Batán. Descarga cauce	371261	4562064	762,2					jul-03	0,1
M-5	puente AVE md	371294	4562006	753,2					jul-03	0,1
M-6	puente AVE md	371280	4561941	757,7					jul-03	0,1
M-7	puente AVE md	371280	4561922	759,8					jul-03	REZUME
M-8	Molino Nuevo	371200	4560649	761,3						0,1
M-9	Fuente Fría	370868	4560359	773,6	818	8,53	17	29	jul-03	0,3
M-10	Manantial de las Endrinas	370868	4560359	773,6						0,1
M-11	Rezume camino cacera Betaya	370908	4560120	774,1						0,1
M-12	Rezumes mi Voltoya	370985	4559961	770,6					jul-03	<0.1
M-13	Manantial Chopera	371103	4559381	767,4					jul-03	<0.1
M-14	Fuente cº Ramirón	371117	4559375	767					jul-03	<0.1
M-15	Fuente de la Olma	371073	4558807	777,4					jul-03	0,2
M-16	Molino del Amor-lavadero	371113	4558201	771,7					jul-03	SECO
M-17	El Granjal	371090	4557986	770,6					jul-03	0,1
M-18	Manantial Marote	371119	4557889	775,9					jul-03	0,1

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

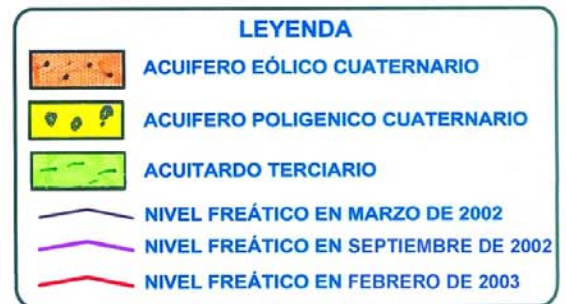
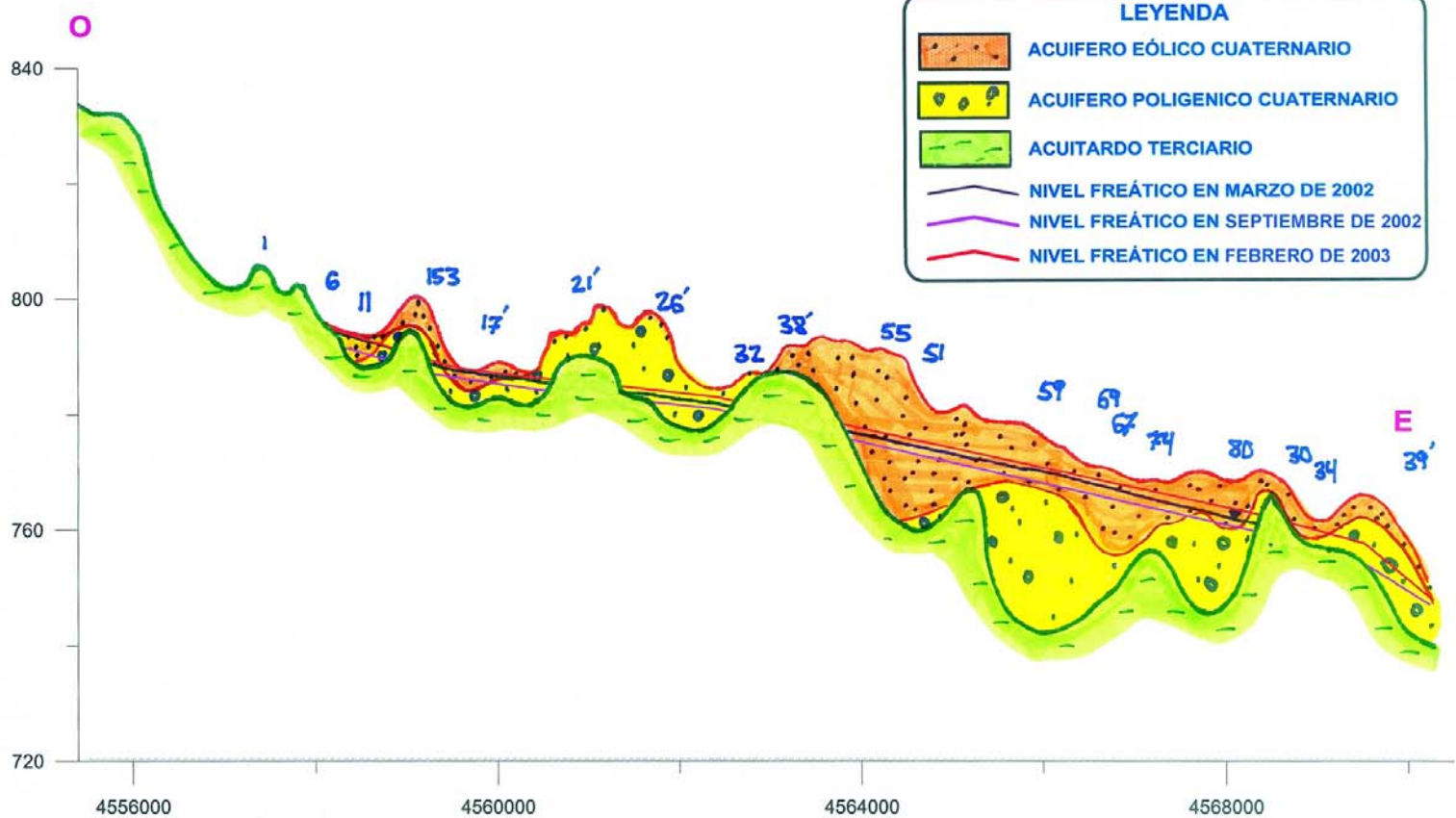
ANEXO 2.5.1. PERFILES HIDROGEOLÓGICOS



CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA PERFILES N-S 1 Y 2

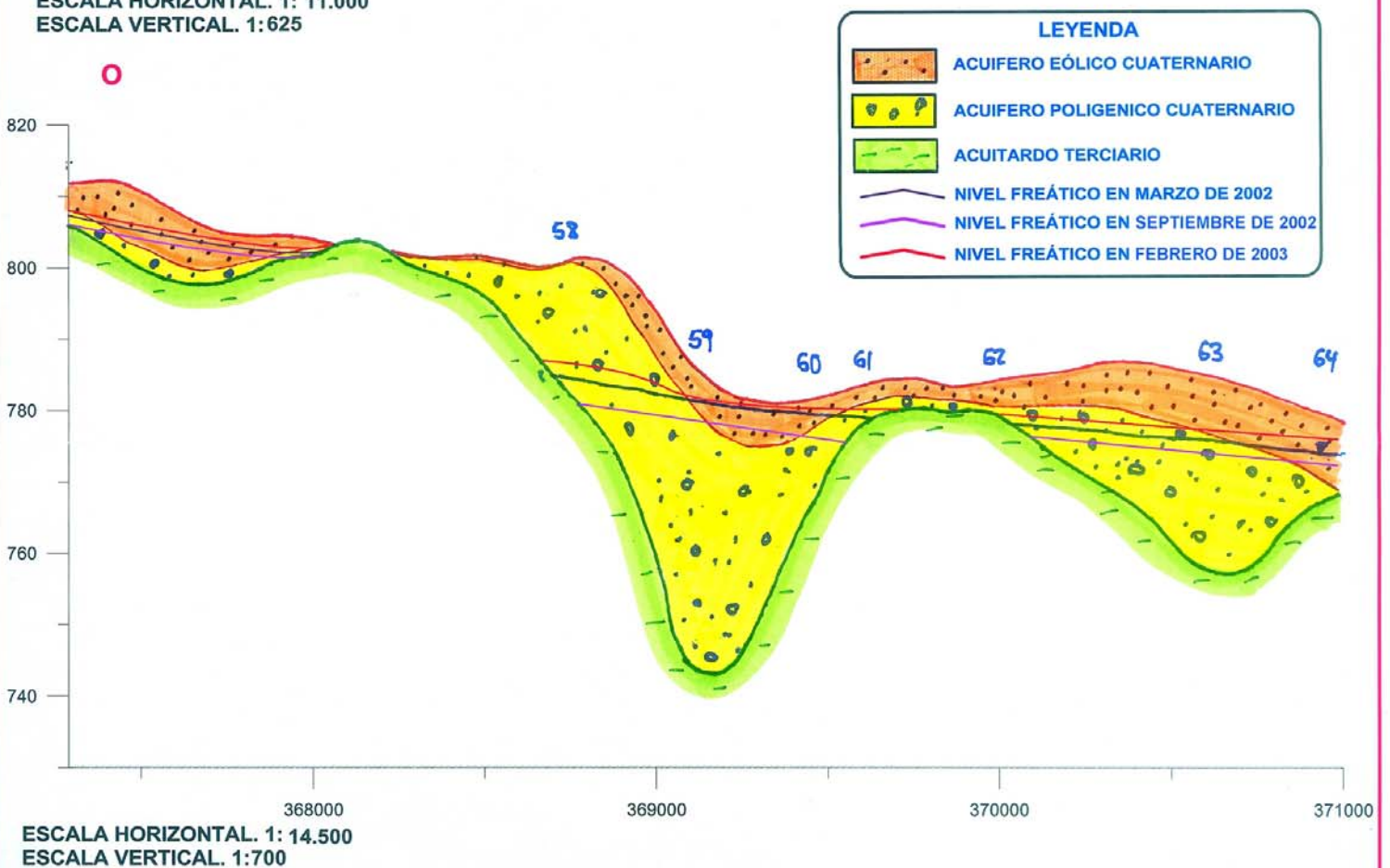
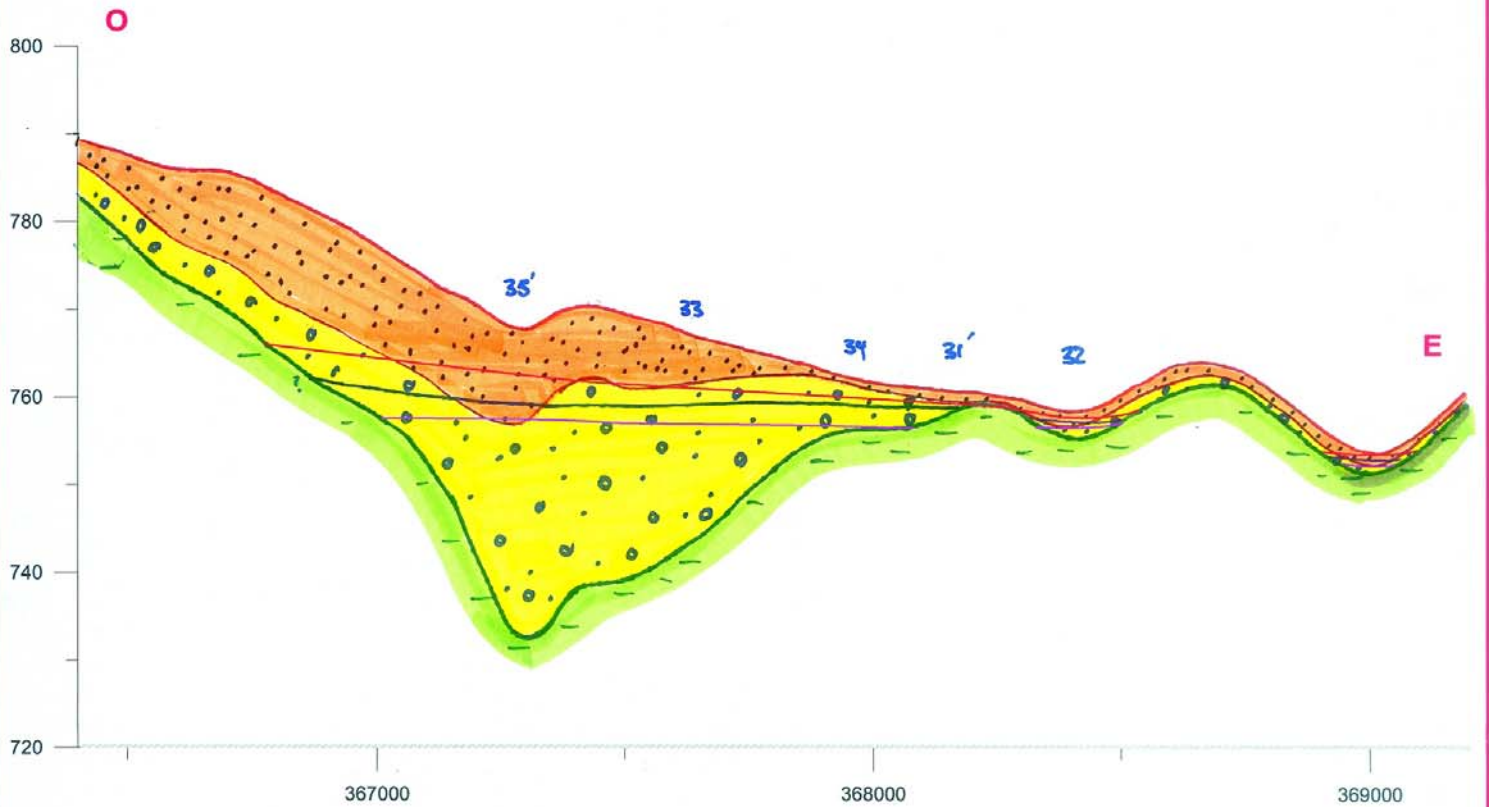


ESCALA VERTICAL. 1: 950
ESCALA HORIZONTAL. 68.000



ESCALA HORIZONTAL. 1: 60.000
ESCALA VERTICAL. 1: 950

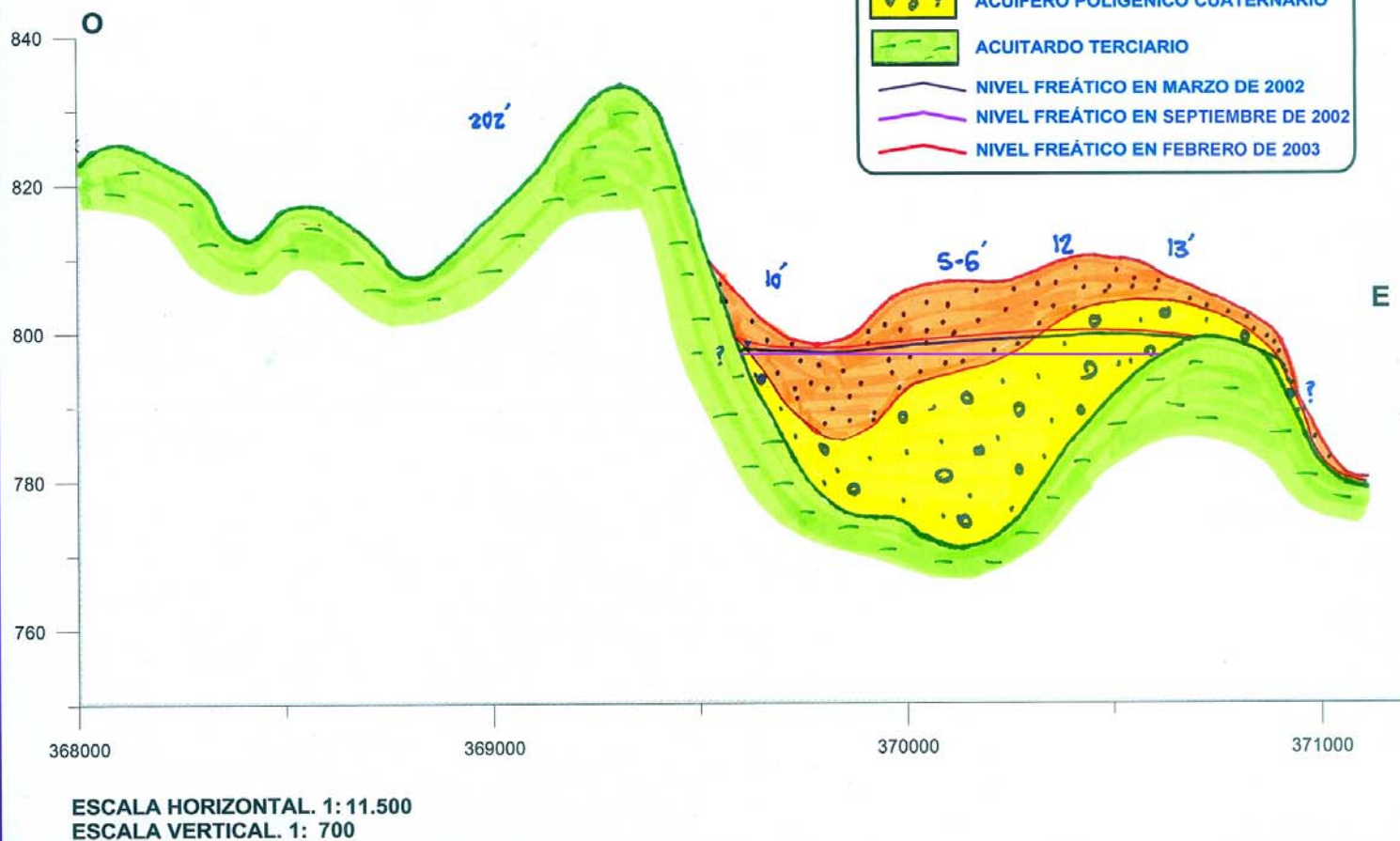
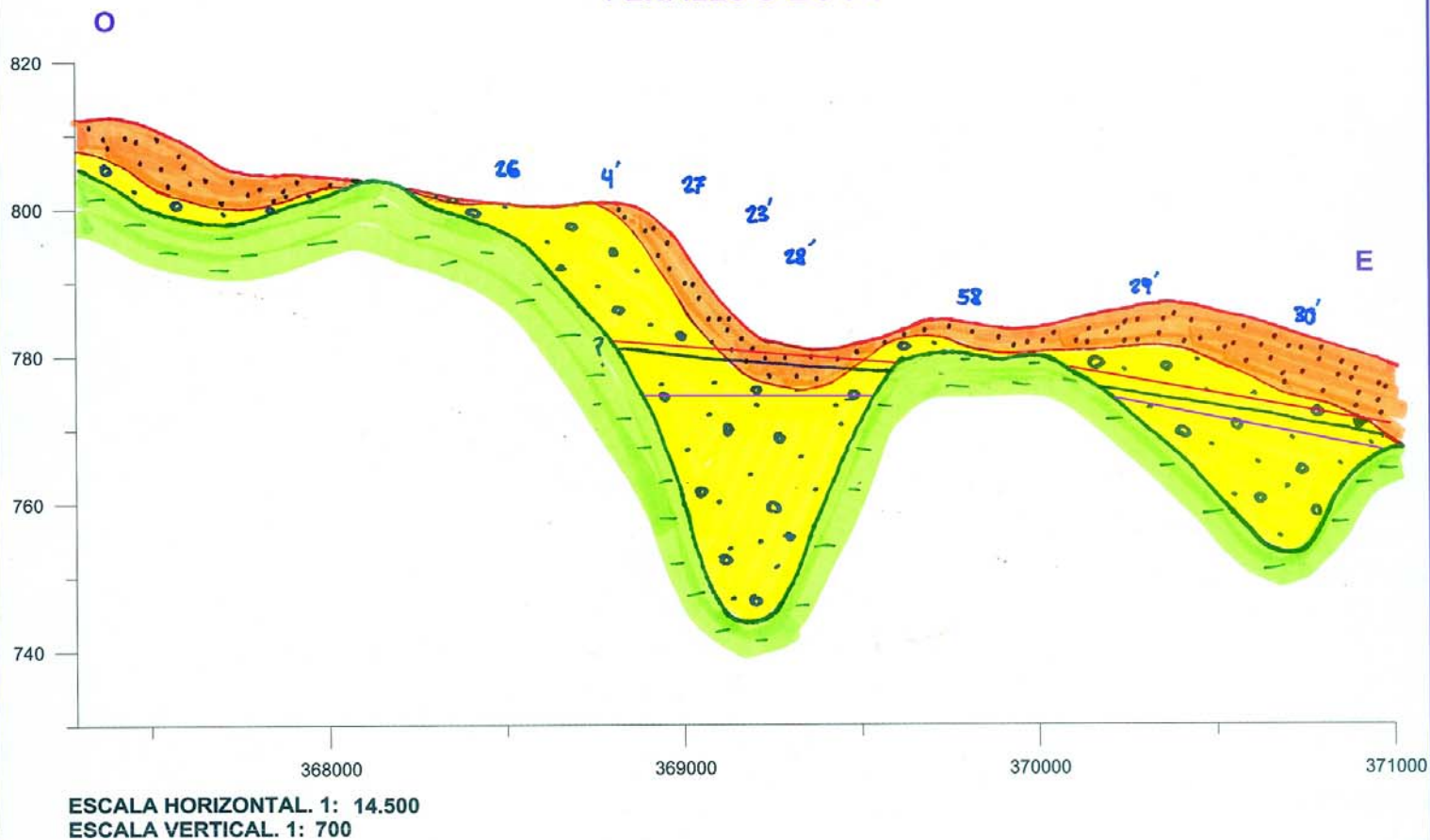
CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA PERFILES O-E 1 Y 2



LEYENDA

- | | |
|--|--------------------------------------|
| | ACUIFERO EÓLICO CUATERNARIO |
| | ACUIFERO POLIGENICO CUATERNARIO |
| | ACUITARDO TERCIARIO |
| | NIVEL FREÁTICO EN MARZO DE 2002 |
| | NIVEL FREÁTICO EN SEPTIEMBRE DE 2002 |
| | NIVEL FREÁTICO EN FEBRERO DE 2003 |

CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA PERFILES O-E 3 Y 4



BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.6. PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y BAREMOS DE CLASIFICACIÓN



CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

Los parámetros hidrogeológicos calculados para el acuífero de la cubeta de Santiuste aparecen resumidos a continuación:

PARÁMETRO HIDROGEOLÓGICO	IRYDA 1990	MAPA 1999	OBSERVACIONES
Transmisividad ($m^2/día$)	305-563	240-678	Coincidente con resultados del CEDEX, 1994.
Permeabilidad vertical (K_v) ($m/día$)		2.97-30.19	MOPU, 1990: 3 $m/día$ SGOP, 1994: 6-10 $m/día$. Laboratorio: 0,0025-77,76
Permeabilidad horizontal (K_h) ($m/día$)	32 - 67	0.24-16.8	Valor medio de 41 $m/día$
Coeficiente de almacenamiento	0.15	0.11- 0.28	Valor promediado de 18.6%

VALORES DE LA TRANSMISIVIDAD (según autores)

T ($m^2/día$)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1.000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1.000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

VALORES DE LA PERMEABILIDAD (según autores)

K ($m/día$)	Calificación estimativa
K < 10^{-2}	Muy baja
10^{-2} < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	Alta
K > 100	Muy alta

VALORES DEL RADIO DE INFLUENCIA

Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores posibles del radio de influencia R
Kárstico	Libre	700 m – 1.000 m
	Semiconfinado	1.000 m – 1.500 m
	Cautivo	1.500 m – 2.000 m
Poroso intergranular	Libre	400 m – 700 m
	Semiconfinado	700 m – 900 m
	Cautivo	900 m – 1.200 m
Kárstico y poroso	Libre	500 m – 1.000 m

BLOQUE 2.- CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

ANEXO 2.7. REDES DE CONTROL

ANEXO 2.7.1. RED DE CONTROL DE LA PIEZOMETRÍA (RCP)

ANEXO 2.7.2. RED DE CONTROL DE LA RECARGA (RCR)



RED DE CONTROL DE LA PIEZOMETRÍA



RCP-03	N° INV	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	fecha	USO	C. (µS/cm)	pH	Tª agua	Tª aire	FECHA
RCP-03-01	3	365813	4572003	754.84	P	5.18	11/03/2004	C	855	8	17.5	35	jun-99
RCP-03-02	7	366030	4571535	757.39	P	7.63	11/03/2004	C	821	9.2	16	32	jun-99
RCP-03-03	9	366546	4571316	757.27	P	5.30	11/03/2004	R	929	7.8	20	34	jun-99
RCP-03-04	16	366215	4570227	763.79	P	7.00	11/03/2004	R	820	7.9	19	31	jun-99
RCP-03-05	20	367419	4570177	764.67	Pi	29.39	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-06	32	366911	4569534	765.72	P	8.00	11/03/2004	C	820	8.5	17	35	jun-99
RCP-03-07	34	367529	4569305	766.17	Pi	40.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-08	43	367436	4568801	769.07	P-S	>110	11/03/2004	I	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
RCP-03-09	43b	367436	4568801	770.18	P-S	5.5	11/03/2004	C	n/a	n/a	n/a	n/a	jun-99
RCP-03-10	56	368074	4568022	768.58	Pi	18.00	11/03/2004	I	741	7.05	11.5	14	jun-02
RCP-03-11	57	368686	4567906	771.13838	Pi	21.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-12	60	367601	4567695	771.28	S	n/a	11/03/2004	R	500	8.8	18	36	jul-99
RCP-03-13	70	369753	4567100	773.9	S	300.00	11/03/2004	C	520	8.1	20	34	jul-99
RCP-03-14	71	369959	4567090	774.25	Pi	35.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-15	76	368629	4566865	773.49	S	n/a	11/03/2004	R	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
RCP-03-16	81	368604	4566501	772.63	S	17.00	11/03/2004	R	1000	8.05	18	34	jul-99
RCP-03-17	84	369306	4566315	776.77	Pi	20.57	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-18	94	368926	4565642	774.99	Pi	20.00	11/03/2004	I	1010	7	9.7	13	jun-02
RCP-03-19	85	368782	4565871	778.73	Pi	25.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-20	104	369787	4565325	778.53	Pi	20.60	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-21	118	370037	4564627	780.16	Pi	20.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-22	121	371224	4564445	782.23	Pi	12.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-23	122	368958	4564189	781.98	Pi	15.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-24	124	369410	4563840	779.9	S	100.00	11/03/2004	O-R	450	9.6	18	36	ago-99
RCP-03-25	129	369626	4563622	779.65	Pi	23.00	11/03/2004	I	940	7.1	13	13	jun-02
RCP-03-26	131	369125	4563515	781.13	S	130.00	11/03/2004	R	1093	9.44	18	34	jul-99
RCP-03-27	135	369557	4563371	784.09	Pi	n/a	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-28	261	369979	4558559	784.92	Pi	21.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-29	138	369368	4563150	782.57	S	22.00	11/03/2004	R	n/a	n/a	n/a	n/a	jul-99
RCP-03-30	149	369376	4562690	775	S	30.00	11/03/2004	R	800	9.3	16	35	jul-99
RCP-03-31	158	369337	4562450	786.56	Pi	21.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-32	159	368915	4562067	788.2	S	110.00	11/03/2004	R	412	10	15	28	jul-99
RCP-03-33	166	370689	4561876	789.13	Pi	18.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-34	167	370816	4561789	789.1	Pi	24.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-35	171	369393	4561456	786.42	Pi	18.30	11/03/2004	I	1230	7	14.5	13	jun-02
RCP-03-36	175	369271	4561276	787.4	S	28.00	11/03/2004	R	1190	9.12	17	33	jul-99
RCP-03-37	181	370648	4560956	791.39	Pi	20.90	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-38	170	369432	4560896	791.08	Pi	18.00	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-39	190	369291	4560515	790.36	P	9.70	11/03/2004	C	1100	8.8	23	40	jul-99
RCP-03-40	204	369662	4560253	792.1	Pi	11.54	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-41	217	370391	4559822	792.57	S	>100	11/03/2004	O	400	10.2	21	35	jul-99
RCP-03-42	222	369033	4559716	790.9	P	14.20	11/03/2004	R	1200	8.9	21	37	jul-99

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

RCP-03	N° INV	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	fecna	USO	C. (µS/cm)	pH	T° agua	T° aire	FECHA
RCP-03-43	234	368631	4559366	797.79	S	389.60	11/03/2004	C	300	10.7	21	40	jul-99
RCP-03-44	245	369475	4559082	795.83	Pi	20.70	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-45	264	369339	4558514	789.1	Pi	20.00	11/03/2004	I	1230	7	14.4	13	jun-02
RCP-03-46	265	369209	4558512	795.21	P	11.20	11/03/2004	C	1300	8.7	18	30	jun-99
RCP-03-47	289	369742	4557952	797.15	P	16.50	11/03/2004	R	700	8.3	18	35	jun-99
RCP-03-48	277	369776	4557346	801.49	P	15.55	11/03/2004	R	900	8.6	18	35	jun-99
RCP-03-49	301	368902	4557236	806.29	P	9.00	11/03/2004	R	900	9.2	19	33	jul-99
RCP-03-50	303	370474	4556999	802.7	Pi	28.30	11/03/2004	I	n/a	n/a	n/a	n/a	feb-03
RCP-03-51	306	369787	4556876	802.19	P	9.90	11/03/2004	R	600	8.5	19	33	jun-99
RCP-03-52	309	370124	4556765	800.28	Pi	39.20	11/03/2004	I	630	6.8	14	13	jun-02
RCP-03-53	320	368002	4555865	832.67	P	10.20	11/03/2004	R	1000	8.3	16	31	jun-99
RCP-03-54	329	371322	4554656	809.01	S	>50	11/03/2004	C	300	8.8	19	31	jun-99

NATURALEZA:

Manantial: M
 Sondeo: S
 Pozo: P
 Piezómetro: Pi

 Sondeo de 50 a 150 m
 Sondeos profundo (más de 150 m)

USOS:

Abastecimiento y Ganadería: A
 Desconocido: O
 Riego: R
 No se usa: C

n/a: no determinado

d: nivel dinámico (pozo bombeando durante muestreo)

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

RCP-03	Nº INV	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E.1 (msnm)	fecha	N.E.2 (msnm)	fecha	N.E.3 (msnm)	fecha	N.E.4 (msnm)	fecha	N.E.5 (msnm)	fecha	N.E.6 (msnm)	fecha
RCP-03-01	3	365796	4572003	754,84	P	5,18	749,93	01/06/1999	749,83	01/08/1999	750,15	01/02/2002	750,04	06/06/2002	749,75	14/09/2002	750,00	12/02/2003
RCP-03-02	7	366030	4571535	757,39	P	7,63	751,34	01/06/1999	751,22	01/08/1999	751,54	01/02/2002	751,43	06/06/2002	751,18	14/09/2002	751,40	12/02/2003
RCP-03-03	9	366546	4571316	757,27	P	5,30	752,55	01/06/1999	752,47	01/08/1999	752,74	01/02/2002	751,67	06/06/2002	752,50	14/09/2002	752,62	12/02/2003
RCP-03-04	16	366215	4570227	763,79	P	7,00	760,89	01/06/1999	760,78	01/08/1999	760,56	01/02/2002	760,47	06/06/2002	760,30	14/09/2002	760,82	12/02/2003
RCP-03-05	20	367419	4570177	764,67	Pi	29,39	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	757,56	21/02/2003
RCP-03-06	32	366911	4569534	765,72	P	8,00	760,72	01/06/1999	760,07	01/08/1999	760,70	01/02/2002	760,52	06/06/2002	760,03	14/09/2002	760,50	12/02/2003
RCP-03-07	34	367529	4569305	766,17	Pi	40,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-08	43	367436	4568801	769,07	P-S	>110	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-09	43b	367436	4568801	770,18	P-S	5.5	764,68	01/06/1999	764,43	01/08/1999	761,54	01/02/2002	761,59	06/06/2002	760,71	14/09/2002	761,38	12/02/2003
RCP-03-10	56	368074	4568022	768,58	Pi	18,00	n/a	n/a	759,18	01/08/1999	761,12	01/02/2002	760,95	05/06/2002	759,60	14/09/2002	760,88	21/02/2003
RCP-03-11	57	368686	4567906	771,13	Pi	21,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-12	60	367601	4567695	771,28	S	n/a	760,95	01/07/1999	761,02	01/08/1999	762,03	01/02/2002	762,01	06/06/2002	761,48	14/09/2002	761,85	12/02/2003
RCP-03-13	70	369753	4567100	773,9	S	300,00	724,19	01/07/1999	723,24	01/08/1999	722,68	01/02/2002	722,17	06/06/2002	n/a	14/09/2002	721,07	12/02/2003
RCP-03-14	71	369959	4567090	774,25	Pi	35,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-15	76	368629	4566865	773,49	S	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-16	81	368604	4566501	772,63	S	17,00	763,76	01/07/1999	763,76	01/08/1999	765,04	01/02/2002	764,93	06/06/2002	764,78	14/09/2002	765,28	12/02/2003
RCP-03-17	84	369306	4566315	776,77	Pi	20,57	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	767,71	21/02/2003
RCP-03-18	94	368926	4565642	774,99	Pi	20,00	n/a	n/a	n/a	01/08/1999	772,89	01/02/2002	772,93	05/06/2002	772,70	14/09/2002	773,44	21/02/2003
RCP-03-19	85	368782	4565871	778,73	Pi	25,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-20	104	369787	4565325	778,53	Pi	20,60	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	769,26	12/02/2003
RCP-03-21	118	370037	4564627	780,16	Pi	20,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	766,31	12/02/2003
RCP-03-22	121	371224	4564445	782,23	Pi	12,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-23	122	368958	4564189	781,98	Pi	15,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-24	124	369410	4563840	779,9	S	100,00	dic-01	01/07/1999	dic-01	01/08/1999	731,70	01/02/2002	723,72	05/06/2002	725,23	14/09/2002	732,80	12/02/2003
RCP-03-25	129	369626	4563622	779,65	Pi	23,00	n/a	n/a	n/a	01/08/1999	776,38	01/02/2002	777,38	05/06/2002	776,27	14/09/2002	777,72	21/02/2003
RCP-03-26	131	369125	4563515	781,13	S	130,00	feb-02	01/07/1999	n/a	01/08/1999	769,89	01/02/2002	770,03	05/06/2002	769,36	14/09/2002	770,89	12/02/2003
RCP-03-27	135	369557	4563371	784,09	Pi	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-28	261	369979	4558559	784,92	Pi	21,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-29	138	369368	4563150	782,57	S	22,00	770,49	01/07/1999	769,57	01/08/1999	771,80	01/02/2002	771,79	05/06/2002	770,77	14/09/2002	773,94	12/02/2003
RCP-03-30	149	369376	4562690	775	S	30,00	n/a	01/07/1999	762,92	01/08/1999	763,77	01/02/2002	764,70	05/06/2002	763,78	14/09/2002	766,46	12/02/2003
RCP-03-31	158	369337	4562450	786,56	Pi	21,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-32	159	368915	4562067	788,2	S	110,00	n/a	01/07/1999	dic-01	01/08/1999	735,00	01/02/2002	732,86	05/06/2002	n/a	14/09/2002	734,68	12/02/2003
RCP-03-33	166	370689	4561876	789,13	Pi	18,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-34	167	370816	4561789	789,1	Pi	24,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-35	171	369393	4561456	786,42	Pi	18,30	n/a	n/a	775,92	01/08/1999	777,87	01/02/2002	777,80	05/06/2002	777,28	14/09/2002	778,43	21/02/2003
RCP-03-36	175	369271	4561276	787,4	S	28,00	778,71	01/07/1999	778,25	01/08/1999	779,14	01/02/2002	778,94	05/06/2002	778,08	14/09/2002	779,33	12/02/2003
RCP-03-37	181	370648	4560956	791,39	Pi	20,90	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	774,46	12/02/2003
RCP-03-38	170	369432	4560896	791,08	Pi	18,00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
RCP-03-39	190	369291	4560515	790,36	P	9,70	781,96	01/07/1999	782,07	01/08/1999	782,14	01/02/2002	782,08	05/06/2002	781,02	14/09/2002	781,36	12/02/2003
RCP-03-40	204	369662	4560253	792,1	Pi	11,54	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	789,78	12/02/2003
RCP-03-41	217	370391	4559822	792,57	S	>100	ene-02	01/07/1999	ene-02	01/08/1999	ene-02	01/02/2002	ene-02	05/06/2002	ene-02	14/09/2002	750,65	12/02/2003
RCP-03-42	222	369033	4559716	790,9	P	14,20	n/a	01/07/1999	785,02	01/08/1999	784,72	01/02/2002	784,62	05/06/2002	783,62	14/09/2002	783,73	12/02/2003
RCP-03-43	234	368631	4559366	797,79	S	389,60	731,79	01/07/1999	n/a	01/08/1999	728,41	01/02/2002	728,52	05/06/2002	732,19	14/09/2002	736,56	12/02/2003
RCP-03-44	245	369475	4559082	795,83	Pi	20,70	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	790,45	12/02/2003
RCP-03-45	264	369339	4558514	789,1	Pi	20,00	n/a	n/a	774,10	01/08/1999	781,00	01/02/2002	780,87	05/06/2002	778,83	14/09/2002	780,18	21/02/2003
RCP-03-46	265	369209	4558512	795,21	P	11,20	785,41	01/06/1999	786,16	01/08/1999	786,85	01/02/2002	786,68	05/06/2002	784,67	14/09/2002	786,24	12/02/2003
RCP-03-47	289	369742	4557952	797,15	P	16,50	785,15	01/06/1999	n/a	01/08/1999	789,73	01/02/2002	789,67	05/06/2002	787,53	14/09/2002	790,98	21/02/2003
RCP-03-48	277	369776	4557346	801,49	P	15,55	790,99	01/06/1999	n/a	01/07/1999	792,75	01/02/2002	792,79	05/06/2002	790,83	14/09/2002	794,88	21/02/2003
RCP-03-49	301	368902	4557236	806,29	P	9,00	799,89	01/06/1999	799,86	01/08/1999	800,88	01/02/2002	800,84	05/06/2002	800,43	14/09/2002	802,85	21/02/2003
RCP-03-50	303	370474	4556999	802,7	Pi	28,30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	784,48	12/02/2003
RCP-03-51	306	369787	4556876	802,19	P	9,90	794,39	01/06/1999	n/a	01/08/1999	797,89	01/02/2002	798,22	05/06/2002	799,27	14/09/2002	799,79	21/02/2003
RCP-03-52	309	370124	4556765	800,28	Pi	39,20	n/a	n/a	786,28	01/08/1999	790,06	01/02/2002	789,51	05/06/2002	787,74	14/09/2002	789,90	21/02/2003
RCP-03-53	320	368002	4555865	832,67	P	10,20	n/a	01/06/1999	828,67	01/08/1999	828,86	01/02/2002	830,67	05/06/2002	829,55	14/09/2002	831,61	21/02/2003
RCP-03-54	329	371322	4554656	809,01	S	>50	794,61	01/06/1999	793,70	01/08/1999	795,95	01/02/2002	795,55	05/06/2002	794,61	14/09/2002	795,83	21/02/2003

CONTRIBUCIONES AL CONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO

N.E.7 (msnm)	fecha	N.E. 8 (msnm)	fecha	N.E. 9 (msnm)	fecha	N.E. 10 (msnm)
n/a	16/03/2003	750,07	14/06/2003	749,93	02/10/2003	748,01
n/a	16/03/2003	751,50	14/06/2003	751,37	02/10/2003	751,37
n/a	16/03/2003	752,63	14/06/2003	752,61	02/10/2003	752,49
n/a	16/03/2003	760,99	14/06/2003	760,53	02/10/2003	760,59
n/a	16/03/2003	757,48	05/06/2003	758,87	02/10/2003	759,34
n/a	16/03/2003	760,84	14/06/2003	759,96	02/10/2003	760,64
n/a	n/a	759,83	11/06/2003	759,74	02/10/2003	760,06
n/a	n/a	n/a	n/a	712,89	02/10/2003	723,30
n/a	16/03/2003	759,62	14/06/2003	761,43	02/10/2003	762,07
n/a	16/03/2003	761,64	05/06/2003	760,99	02/10/2003	762,54
n/a	n/a	N/A	11/06/2003	763,61	02/10/2003	764,56
n/a	16/03/2003	762,35	14/06/2003	762,39	02/10/2003	762,91
n/a	16/03/2003	N/A	14/06/2003	717,65	02/10/2003	n/a
n/a	n/a	n/a	n/a	750,49	02/10/2003	750,30
n/a	n/a	n/a	n/a	764,66	02/10/2003	770,05
n/a	16/03/2003	766,80	14/06/2003	766,27	02/10/2003	769,04
767,86	16/03/2003	767,99	05/06/2003	766,31	02/10/2003	766,75
n/a	16/03/2003	773,36	05/06/2003	772,95	02/10/2003	773,74
n/a	n/a	n/a	n/a	768,88	02/10/2003	769,74
769,35	16/03/2003	769,59	05/06/2003	767,57	02/10/2003	767,92
766,36	16/03/2003	766,33	05/06/2003	767,31	02/10/2003	767,57
n/a	n/a	777,57	11/06/2003	771,30	02/10/2003	771,33
n/a	n/a	771,76	11/06/2003	771,89	02/10/2003	772,83
n/a	16/03/2003	N/A	14/06/2003	n/a	02/10/2003	n/a
n/a	16/03/2003	777,49	05/06/2003	776,95	02/10/2003	778,57
n/a	16/03/2003	N/A	14/06/2003	772,11	02/10/2003	774,38
n/a	n/a	n/a	n/a	780,00	02/10/2003	779,66
n/a	n/a	783,65	11/06/2003	770,32	02/10/2003	770,33
n/a	16/03/2003	774,99	14/06/2003	773,17	02/10/2003	777,50
n/a	16/03/2003	767,55	14/06/2003	766,50	02/10/2003	770,08
n/a	n/a	777,93	11/06/2003	777,41	02/10/2003	780,13
n/a	16/03/2003	N/A	14/06/2003	731,68	02/10/2003	736,57
n/a	n/a	775,69	11/06/2003	775,24	02/10/2003	774,91
n/a	n/a	n/a	n/a	774,27	02/10/2003	773,74
n/a	16/03/2003	778,87	05/06/2003	778,40	02/10/2003	779,78
n/a	16/03/2003	N/A	05/06/2003	779,45	02/10/2003	780,80
773,71	16/03/2003	773,69	05/06/2003	773,22	02/10/2003	777,46
n/a	n/a	n/a	n/a	787,13	02/10/2003	787,28
n/a	16/03/2003	782,28	05/06/2003	781,79	02/10/2003	782,88
790,20	16/03/2003	789,30	05/06/2003	790,09	02/10/2003	791,44
n/a	16/03/2003	N/A	05/06/2003	749,93	02/10/2003	750,33
n/a	16/03/2003	784,98	05/06/2003	784,83	02/10/2003	785,00
n/a	16/03/2003	N/A	05/06/2003	734,66	02/10/2003	737,80
791,12	16/03/2003	792,08	05/06/2003	789,10	02/10/2003	790,29
n/a	16/03/2003	789,29	05/06/2003	781,81	02/10/2003	782,97
n/a	16/03/2003	788,31	05/06/2003	787,90	02/10/2003	789,38
n/a	16/03/2003	792,20	05/06/2003	790,89	02/10/2003	792,64
n/a	16/03/2003	800,08	05/06/2003	793,98	02/10/2003	795,24
n/a	16/03/2003	802,81	05/06/2003	801,13	02/10/2003	801,61
784,37	16/03/2003	784,32	05/06/2003	783,19	02/10/2003	783,35
n/a	16/03/2003	799,66	05/06/2003	799,33	02/10/2003	798,53
n/a	16/03/2003	790,39	05/06/2003	790,09	02/10/2003	790,95
n/a	16/03/2003	831,06	05/06/2003	830,30	02/10/2003	831,53
n/a	16/03/2003	796,00	05/06/2003	795,02	02/10/2003	796,05

RED DE CONTROL DE LA RECARGA (RCR) MEDIDAS AÑO HIDROLÓGICO 2002/03.

rcr 03	INV	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	medida	NE-MSN	FECHA	USO	C. (µS/cm)	pH	Tª ag	Tª air	FECHA	FACIES
rcr 1	309	370124	4556765	802,90	Pi	39,2	10,19	792,71	01/10/2003	I	630	6,8	14	13	Jun-02	
rcr 2	303	370474	4556999	803,89	Pi	28,3	19,51	784,38	01/10/2003	I	-	-	n/a	n/a	1/13/03	
rcr 3	298	369889	4557497	802,55	P	7,3	7,95	794,60	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 4	297	369777	4557600	801,42	P	11	7,60	793,82	01/10/2003	C	1100	8,2	18	37	Jun-99	-
rcr 5	296	369961	4557653	803,03	P	6,52	SECO	N/A	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 6	295	369939	4557765	802,91	P	6,77	7,74	795,17	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 7	291	369530	4557854	801,86	P	N/A	8,28	793,58	01/10/2003	O						
rcr 8	287	370063	4557972	801,41	P	N/A	4,00	797,41	01/10/2003	O						
rcr 9	285	370182	4558002	800,99	P	1,97	3,45	797,54	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 10	282	370115	4558015	799,90	P	0,9	2,51	797,39	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 11	273	369929	4558337	801,03	P	1,98	3,59	797,44	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 12	269	369975	4558467	799,32	P	1,49	3,00	796,32	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 13	253	369910	4558832	799,30	P	5,6	3,33	795,97	01/10/2003	C	900	8,6	20	34	Jun-99	-
rcr 14	247	369860	4558955	798,06	P	N/A	3,54	794,52	01/10/2003	A						
rcr 15	244	369807	4559143	797,17	P	N/A	3,85	793,32	01/10/2003	A						
rcr 16	241	369732	4559154	797,87	P	N/A	3,45	794,42	01/10/2003	C						
rcr 17	204	369662	4560253	792,10	Pi	11,54	2,01	790,09	01/10/2003	I	230	8,9	n/a	n/a	1/13/03	
rcr-18	184	369377	4560682	790,79	S	18	3,95	786,84	01/10/2003	I						
rcr 19	171	369393	4561456	788,82	Pi	18,3	8,02	780,80	01/10/2003	I	1230	7	14,5	13	Jun-02	
rcr 20	169	369364	4561611	786,93	S	30	8,04	778,89	01/10/2003	R	n.d.	n.d.	n.d.	*	Jul-99	-
rcr 21	155	369655	4562513	785,23	Pi		11,30	773,93	01/10/2003	I						
rcr 22	147	369575	4562780	784,99	S	n.d.	N/A	N/A	01/10/2003	R	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-
rcr 23	146	369567	4562873	783,05	P	60,3	>120	N/A	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 24	144	369495	4563034	783,08	S	n.d.	SECO	N/A	01/10/2003	R	900	9,3	16	36	Jul-99	-
rcr 25	138	369540	4563116	779,90	P	7,18	6,30	773,60	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 26	137	369549	4563127	783,38	P	9,7	8,76	774,62	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 27	135	369694	4563335	784,09	Pi		4,09	780,00	01/10/2003	I						
rcr 28	133	369369	4563450	782,92	P	n.d.	8,25	774,67	01/10/2003	R	1090	9,2	14	34	Jul-99	-
rcr 29	129	369626	4563622	782,00	Pi	23	2,70	779,30	01/10/2003	I	940	7,1	13	13	Jun-02	
rcr 30	127	369506	4563675	782,45	S	200	>100	N/A	01/10/2003	R	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Jul-99	-
rcr 31	119	369110	4564557	780,03	S	30	8,60	771,43	01/10/2003	R	1100	9,6	15	36	Jul-99	Bi-Su-Mg-Ca
rcr 32	116	369239	4564829	779,01	P	10,5	6,68	772,33	01/10/2003	R	1480	7,95	17	32	Jul-99	-
rcr 33	115	369213	4564920	779,01	P	8,17	7,00	772,01	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 34	103	369166	4565346	771,60	P	7,6	5,01	766,59	01/10/2003	R	1400	8,25	17	32	Jul-99	-
rcr 35	94	368926	4565642	778,73	Pi	20	2,04	776,69	01/10/2003	I	1010	7	9,7	13	Jun-02	
rcr 36	91	368870	4565798	778,77	P	7,76	SECO	N/A	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 37	90	368850	4565882	779,66	P	seco	SECO	N/A	01/10/2003	O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Feb-03	-
rcr 38	88	368883	4566020	773,49	S		8,83	764,66	01/10/2003	R	679	7,70	18	36	Jul-03	

NATURALEZA:

Manantial: M
 Sondeo: S
 Pozo: P
 Piezómetro: Pi

Abastecimiento y Ganadería:
 Desconocido:
 Riego:
 No se usa:
 Investigación:

USOS:

A
 O
 R
 C
 I

n/a- n.d.: no determinado
 d: nivel dinámico

**RED DE CONTROL DE LA RECARGA (RCR)
MEDIDAS AÑO HIDROLÓGICO 2002/03.**

rcr 03	INV	X	Y	Z	NE-MSNM	FECHA	NE-MSNM	FECHA	NE-MSNM	FECHA	NE-MSNM	FECHA	NE-MSNM	FECHA
rcr 1	309	370124	4556765	802,90	793,5	16/01/2003	793,9	07/02/2003	794,1	20/02/2003	792,00	24/03/2003	792,71	01/10/2003
rcr 2	303	370474	4556999	803,89	784,0	16/01/2003	784,2	07/02/2003	784,60	20/02/2003	784,46	24/03/2003	784,38	01/10/2003
rcr 3	298	369889	4557497	802,55	795,2	16/01/2003	795,6	07/02/2003	795,6	20/02/2003	797,27	24/03/2003	794,60	01/10/2003
rcr 4	297	369777	4557600	801,42	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	793,82	01/10/2003
rcr 5	296	369961	4557653	803,03	796,5	16/01/2003	796,5	07/02/2003	796,6	20/02/2003	797,81	24/03/2003	N/A	01/10/2003
rcr 6	295	369939	4557765	802,91	796,1	16/01/2003	796,1	07/02/2003	796,0	20/02/2003	798,27	24/03/2003	795,17	01/10/2003
rcr 7	291	369530	4557854	801,86	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	N/A	20/02/2003		24/03/2003	793,58	01/10/2003
rcr 8	287	370063	4557972	801,41	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	799,1	20/02/2003	800,03	24/03/2003	797,41	01/10/2003
rcr 9	285	370182	4558002	800,99	799,0	16/01/2003	799,0	07/02/2003	799,0	20/02/2003	799,84	24/03/2003	797,54	01/10/2003
rcr 10	282	370115	4558015	799,90	799,0	16/01/2003	798,8	07/02/2003	798,8	20/02/2003	799,11	24/03/2003	797,39	01/10/2003
rcr 11	273	369929	4558337	801,03	799,0	16/01/2003	798,9	07/02/2003	798,7	20/02/2003	799,73	24/03/2003	797,44	01/10/2003
rcr 12	269	369975	4558467	799,32	797,8	16/01/2003	797,8	07/02/2003	797,7	20/02/2003	798,09	24/03/2003	796,32	01/10/2003
rcr 13	253	369910	4558832	799,30	797,7	16/01/2003	797,6	07/02/2003	797,5	20/02/2003	798,33	24/03/2003	795,97	01/10/2003
rcr 14	247	369860	4558955	798,06	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	795,9	20/02/2003	797,05	24/03/2003	794,52	01/10/2003
rcr 15	244	369807	4559143	797,17	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	794,9	20/02/2003	795,70	24/03/2003	793,32	01/10/2003
rcr 16	241	369732	4559154	797,87	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	795,0	20/02/2003	795,44	24/03/2003	794,42	01/10/2003
rcr 17	204	369662	4560253	792,10	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	790,09	01/10/2003
rcr-18	184	369377	4560682	790,79	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	786,84	01/10/2003
rcr 19	171	369393	4561456	788,82	780,1	16/01/2003	780,4	07/02/2003	780,5	20/02/2003	781,31	24/03/2003	780,80	01/10/2003
rcr 20	169	369364	4561611	786,93	778,6	16/01/2003	778,8	07/02/2003	778,8	20/02/2003	761,06	24/03/2003	778,89	01/10/2003
rcr 21	155	369655	4562513	785,23	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	773,93	01/10/2003
rcr 22	147	369575	4562780	784,99	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	01/10/2003
rcr 23	146	369567	4562873	783,05	722,8	16/01/2003	723,6	07/02/2003	N/A	20/02/2003	724,54	24/03/2003	N/A	01/10/2003
rcr 24	144	369495	4563034	783,08	773,7	16/01/2003	774,8	07/02/2003	774,9	20/02/2003	776,21	24/03/2003	N/A	01/10/2003
rcr 25	138	369540	4563116	779,90	772,7	16/01/2003	773,9	07/02/2003	774,0	20/02/2003	772,42	24/03/2003	773,60	01/10/2003
rcr 26	137	369549	4563127	783,38	773,7	16/01/2003	774,9	07/02/2003	774,9	20/02/2003	776,03	24/03/2003	774,62	01/10/2003
rcr 27	135	369694	4563335	784,09	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	780,00	01/10/2003
rcr 28	133	369369	4563450	782,92	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	774,67	01/10/2003
rcr 29	129	369626	4563622	782,00	781,5	16/01/2003	780,3	07/02/2003	779,5	20/02/2003	782,31	24/03/2003	779,30	01/10/2003
rcr 30	127	369506	4563675	782,45	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	01/10/2003
rcr 31	119	369110	4564557	780,03	N/A	16/01/2003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	771,43	01/10/2003
rcr 32	116	369239	4564829	779,01	772,5	16/01/2003	773,6	07/02/2003	773,6	20/02/2003	774,94	24/03/2003	772,33	01/10/2003
rcr 33	115	369213	4564920	779,01	770,8	16/01/2003	773,3	07/02/2003	773,4	20/02/2003	N/A	24/03/2003	772,01	01/10/2003
rcr 34	103	369166	4565346	771,60	770,3	16/01/2003	771,3	07/02/2003	770,8	20/02/2003	773,35	24/03/2003	766,59	01/10/2003
rcr 35	94	368926	4565642	778,73	777,2	16/01/2003	777,3	07/02/2003	777,2	20/02/2003	777,28	24/03/2003	776,69	01/10/2003
rcr 36	91	368870	4565798	778,77	771,0	16/01/2003	N/A	07/02/2003	N/A	20/02/2003	774,55	24/03/2003	N/A	01/10/2003
rcr 37	90	368850	4565882	779,66	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	N/A	20/02/2003	774,65	24/03/2003	N/A	01/10/2003
rcr 38	88	368883	4566020	773,49	N/A	16/01/2003	N/A	07/02/2003	N/A	20/02/2003	N/A	24/03/2003	764,66	01/10/2003

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

3.1.1. POLOS FRÍOS DEL SISTEMA

3.1.1.1/2. RESULTADOS ANALÍTICOS / PARÁMETROS INESTABLES

3.1.1.3. CARACTERIZACIÓN



RESULTADOS DE LA ANALÍTICA EN LOS POLOS FRÍOS DEL SISTEMA

POLOS FRÍOS

CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE MUESTREO

polo frio	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	N.E.	fecha	USO	Litolog	C (µS/cm)	pH c	Tª ag	Tª ai	FECHA	Ox. Dis.	TSD
RIO VOLTOYA 02	371113	4558201	771,7	RIO	0	0	771,7	jul-02	AR	DETR	435	7,73			jul-02	8,8	
AGUA DE LLUVIA 2502	368149	4557450	820,0	LLUVIA	N/A	N/A	N/A	abr-03	NR	DETR	49	6,77			mar-03		
AGUA RECARGA DIC 02	371038	4558192	789,7	CAZ 0	0	0	789,7	feb-03	AR	DETR	165	8,6	5,9	6,5	feb-03	5,1	75
AGUA RECARGA Feb 03	370024	4557313	789,7	CAZ 1	0	0	789,73	feb-03	AR	DETR	165				feb-03	8,8	
POLO FRIO SO 03	368537	4556643	819,8	MANANT	0	0	819,8	abr-03	A	DETR	829	7,8			abr-03		
POLO FRIO O2	367579	4558949	814,7	MANANT	0	0	814,7	abr-03	O	DETR	932	8,1			abr-03		

RESULTADO DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

polo frio	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO3(mg/l)	CO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	SiO2(mg/l)	COND	pH	FACIES
VOLTOYA 02	31,54	2,23	70,54	1,95	39	247,74	0	2,19	2,71	N/A	N/A	N/A	HCO-Ca
AGUA DE LLUVIA	1,29	0,16	4,81	1,95	4,96	23,19	0	2,75	2,84	0,62	40	6,94	HCO-Ca
AGUA RECARGA Feb 03	13	2	16	5	13	78	< 8	< 3	2	8,7	191	8,0	Ca-Na-Mg-HCO3-Cl
POLO FRIO SO 03	38	4	102	22	48	302	<8	27	103	33	829	7,8	Ca-Mg-HCO3
POLO FRIO O2	30	3	110	18	96	243	<8	35	82	21	932	8,1	Ca-Na-HCO3-Cl

DETERMINACIONES PARAMETROS INESTABLES EN EL DISPOSITIVO DE RECARGA ARTIFICIAL (AR)

polo frio	pH	Cond	TDS	O2	NO3	Th	Ta	FECHA
CABECERA	8,5	290	0,14	8,8	1,8	8	5	19/12/2002
SANCHON	8,8	280	0,13	10,6	5,3	8	6	19/12/2002

HUMEDALES

HUM-Nº	TIPO	NOMBRE	FECHA	X	Y	Z
19	AZUL	Los Majuelos	31-07-03	364390	4570049	778,2
46	AZUL	Ciruelos	06-08-03	367272	4565455	794,8

HUMEDAL	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO3(mg/l)	CO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	C (µS/cm)	pH c		FACIES
19	972	1.148	217	451	2.139	775	318	1.373	2,01	8790	8,74		Cl-HCO-SO4-Na-Mg
46	112,0	11,0	110,0	129,0	145,0	580,0	0	222,0	126,0	1870	8,1		HCO-Mg-Ca

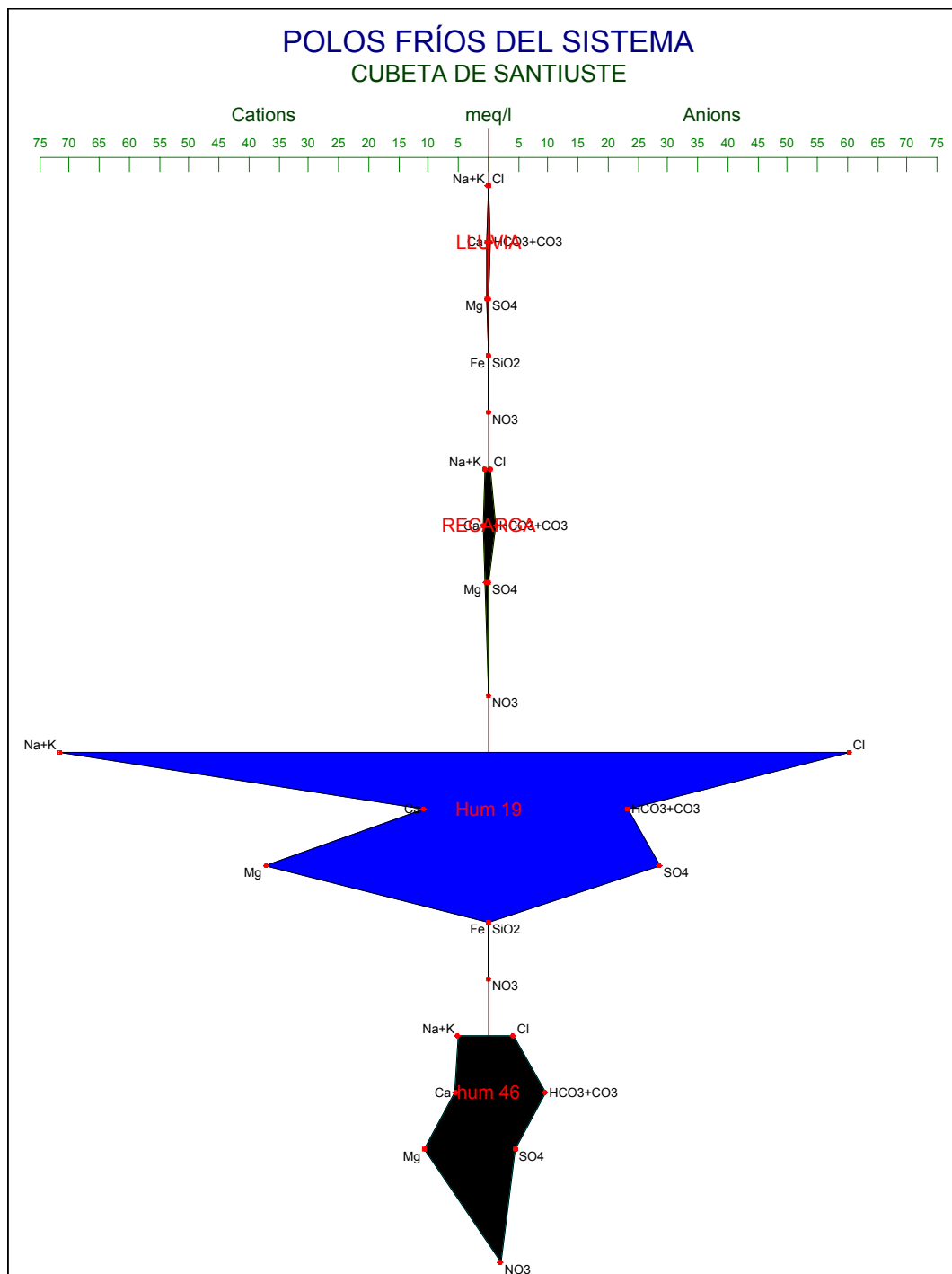
TABLA RESUMEN POSICIÓN

polo frio	X	Y	Z	NAT
RIO VOLTOYA 02	371113	4558201	1	RIO
AGUA DE LLUVIA 2502	368149	4557450	2	LLUVIA
AGUA RECARGA DIC 02	371038	4558192	3	CAZ 0
AGUA RECARGA Feb 03	370024	4557313	4	CAZ 1
POLO FRIO SO 03	368537	4556643	5	M
POLO FRIO O2	367579	4558949	5	M
Los Majuelos	364390	4570049	6	HUMEDAL
Ciruelos	367272	4565455	6	HUMEDAL

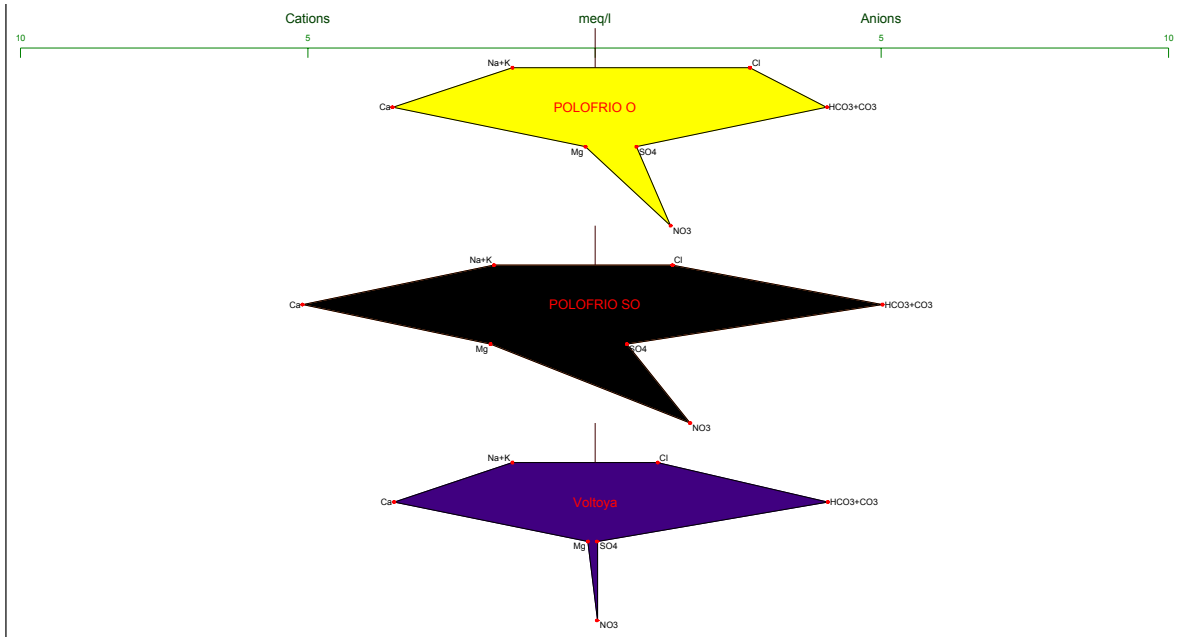
OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

HIDROGRAMAS CARACTERIZACIÓN POLOS FRÍOS

polo frio	X	Y	Z	NAT
RIO VOLTOYA 02	371113	4558201	1	RIO
AGUA DE LLUVIA 2502	368149	4557450	2	LLUVIA
AGUA RECARGA DIC 02	371038	4558192	3	CAZ 0
AGUA RECARGA Feb 03	370024	4557313	4	CAZ 1
POLO FRIO SO 03	368537	4556643	5	M
POLO FRIO O2	367579	4558949	5	M
Los Majuelos	364390	4570049	6	HUMEDAL
Ciruelos	367272	4565455	6	HUMEDAL



**OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO**



BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

3.1.2. RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA. FASE PREOPERACIONAL (RCH-1999)

3.1.2.1. RESULTADOS ANALÍTICOS

3.1.2.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INESTABLES

3.1.2.3. CARACTERIZACIÓN



RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA 1999

COORDENADAS					Nivel Estático/piezométrico															
RCH	INV	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	l z (cm)	N.E. (msnm)	fecha	USO	Litolog	C. (µS/cm)	pH c	Tª agua	Tª aire	FECHA	Ox. Dis.	pH I	Cond. (µS/cm)
1	5	366002	4571760	756	P-S	7	5,48	70	751,22	jun-99	R	DETR	870	8,1	18	35	jun-99	6,9	7,50	944,0
2	33	367924	4569398	766,298	S	>150	N.D.	0	N.D.		O	DETR	840	7,6	19	33	jul-99	9,5	7,50	800,0
3	30	366758	4569620	768	P	9,1	7,6d	50	d	jun-99	R	DETR	620	8,5	21	36	jun-99	7,0	7,50	670,0
4	50	367503	4568300	770	S	N.D.	11,30d	0	d	jun-99	R	DETR	1200	7,85	20	36	jun-99	8,0	7,50	1262,0
5	63	369163	4567640	775	S	270	N.D.	0	d		R	DETR	510	8,4	22	34	jul-99	8,3	8,20	493,0
6	67	367914	4567270	770	S	>75	11d	0	N.D.	jul-99	R	DETR	400	9,1	16	34	jul-99	9,0	9,40	358,0
7	70	369753	4567100	772,867	S	>150	49,71	30	723,457	jul-99	C	DETR	520	8,1	20	34	jul-99	5,2	7,60	540,0
8	81	368604	4566501	772,632	S	17	8,82	0	763,812	jul-99	R	DETR	1000	8,05	18	34	jul-99	6,5	7,4	1333
9	89	368670	4565940	770	S	18	11,3d	0	d	jul-99	R	DETR	840	8	17	34	jul-99	8,0	7,50	1199,0
10	101	367302	4565377	793,631	P	4,05	2,33	40	791,701	jul-99	C	DETR	1870	8,1	17	30	jul-99	4,2	7,60	2040,0
11	119	369188	4564550	775	S	30	N.D.	0	d		R	DETR	1100	9,6	15	36	jul-99	10	7,6	1414,0
12	131	369125	4563515	781138	S	130	12,93d/13,5d	20	d	jul-99	R	DETR	1093	9,4	18	34	jul-99	8,8	7,70	1563,0
13	160	368915	4562067	788203	S	110	6,84d	17	d	jul-99	R	DETR	412	10	15	28	jul-99	9,2	9,10	375,0
14	176	369268	4561050	785	S	25	9,80d	0	d	jul-99	R	DETR	1200	9,08	14	34	jul-99	10,1	7,70	1497,0
15	192	368951	4560500	771	S	N.D.	N.D.	0	N.D.		R	DETR	680	9,2	16	32	jul-99	6,4	7,90	1250,0
16	190	369291	4560515	790,369	P	9,7	8,4	0	781,969	jul-99	C	DETR	1100	8,8	23	40	jul-99	9,2	7,90	1328,0
17	205	368899	4560200	786	P	15,5	11	-200	773	jul-99	C	DETR	1100	8,21	19	38	jul-99	11,4	8,00	1263,0
18	217	370391	4559822	792,57	S	>100	41	0	751,57	jul-99	O	DETR	400	10,2	21	35	jul-99	6,0	7,70	1469,0
19	224	369501	4559667	792,769	S	21,0*	N.D.	0	792,769	jul-99	R	DETR	1010	8,15	16	33	jul-99	N.D.	7,60	1214,0
20	222	369033	4559716	790902	P	14,2	11,20d	-200	d	jul-99	R	DETR	1200	8,9	21	37	jul-99	6,5	7,40	1247,0
21	265	369209	4558512	796,611	P	11,2	9,8	0	786,811	jun-99	C	DETR	1300	8,7	18	30	jun-99	6,1	7,80	1269,0
22	298	369844	4557520	803	P	16,5	11,0d	0	d	jun-99	R	DETR	800	8,3	19	37	jun-99	12,0	7,80	947,0
23	299	370010	4557359	795,101	P	12,4	9,6	-400	781,501	jun-99	C	DETR	500	8,7	19	34	jun-99	7,6	7,30	506,0
24	300	369837	4557330	806	P	17	11,7d	0	d	jun-99	R	DETR	900	8,4	15	35	jun-99	N.D.	7,30	1068,0
25	301	368902	4557236	806,29	P	9	6,4	100	800,89	jun-99	R	DETR	900	9,2	19	33	jun-99	6,2	8,00	967,0
26	314	367520	4556512	831,42	S	>150	N.D.	0	N.D.		R	DETR	410	8,85	20	35	jun-99	8,0	8,50	412,0
27	318	370606	4556014	800,991	P	13,9	12,7	-300	785,291	jun-99	C	DETR	300	8	17	34	jun-99	6,7	7,20	592,0
28	320	368002	4555865	832,675	P	10,2	7	40	826,075	jun-99	R	DETR	1000	8,3	16	31	jun-99	6,4	7,5	764

NATURALEZA:

Manantial: M
 Sondeo: S
 Pozo: P
 Charca: CH

Abastecimiento y Ganadería: A
 Desconocido: O
 Riego: R
 No se usa: C

USOS:

N.D. No determinado

d Nivel dinámico (pozo bombeando durante el muestreo).

Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.



Sondeo de profundidad superior a 150 m.

pH c: determinación en campo

pH I: determinación en laboratorio

RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA 1999. ANÁLISIS

RCH	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	CO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	FACIES
1	48,0	1,0	69,0	57,0	43,0	343,0	0	73,0	93,0	HCO-Mg-Ca
2	133,0	2,6	29,0	13,0	40,0	268,0	0	64,0	89,0	HCO-Na
3	13,0	1,0	53,0	39,0	43,0	147,0	0	48,0	121,0	HCO-Mg
4	54,0	1,2	101,0	80,0	81,0	342,0	0	141,0	168,0	HCO-Mg-Ca
5	78,0	1,1	23,0	6,8	26,0	176,0	4	22,0	58,0	HCO-Na
6	93,0	0,1	12,0	1,0	14,0	142,0	18	11,0	6,5	HCO-Na
7	97,0	8,9	19,0	1,9	16,0	324,0	0	2,0	2,4	HCO-Na
8	78	0,5	84	82	80	343	0	148	187	HCO-Mg-Ca
9	54,0	0,7	76,0	82,0	64,0	395,0	0	137,0	122,0	HCO-Mg
10	112,0	11,0	110,0	129,0	145,0	580,0	0	222,0	126,0	HCO-Mg-Ca
11	85	0,7	100	68	147	369	0	16	269	HCO-Mg-Ca
12	77	0,7	97	91	156	397	0	17	253	HCO-Mg-Ca
13	86,0	0,3	2,0	1,0	16,0	168,0	5	18,0	11,0	HCO-Na
14	61,0	1,1	82,0	102,0	153,0	375,0	0	162,0	172,0	HCO-Cl-Mg
15	68,0	1,0	78,0	82,0	101,0	370,0	0	129,0	122,0	HCO-Mg-Ca
16	80,0	5,0	120,0	75,0	105,0	380,0	0	66,0	237,0	HCO-Mg-Ca
17	84,0	4,0	124,0	62,0	90,0	405,0	0	55,0	180,0	HCO-Ca-Mg
18	74,0	7,0	127,0	68,0	136,0	338,0	0	65,0	284,0	HCO-Ca-Mg
19	89,0	4,0	116,0	40,0	86,0	395,0	0	54,0	139,0	HCO-Ca-Na
20	72,0	5,0	129,0	48,0	97,0	322,0	0	62,0	205,0	HCO-Ca-Mg
21	68,0	12,0	101,0	83,0	85,0	379,0	0	41,0	283,0	HCO-Mg-Ca
22	47,0	4,0	84,0	53,0	68,0	357,0	0	36,0	132,0	HCO-Mg-Ca
23	16,0	2,0	70,0	14,0	26,0	87,0	0	21,0	159,0	HCO-Cl-Ca
24	40,0	3,0	92,0	66,0	131,0	279,0	0	62,0	159,0	SO-Mg
25	52,0	7,0	79,0	56,0	92,0	349,0	0	31,0	37,0	HCO-Mg-Ca
26	72,0	2,0	14,0	12,0	29,0	174,0	7	11,0	11,9	HCO-Na
27	27,0	2,0	73,0	16,0	23,0	216,0	0	21,0	106,0	HCO-Ca
28	45	3	72	34	40	369	0	14	30,8	HCO-Ca-Mg

 Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.
 Sondeo de profundidad superior a 150 m.

RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA. CONCENTRACIONES E ISORRELACIONES

RCH	Cond. (μS/cm)	Na (meq/l)	K (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Cl (meq/l)	HCO ₃ (meq/l)	CO ₃ (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	NO ₃ (meq/l)	Mg/Ca	K/Na	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	Na/Ca	Na/Cl	Ca/SO ₄	Ca/Mg	Na/(Ca+Mg)	SO ₄ /Ca	(Ca/HCO ₃) ²	I.C.	I.A.	I.C.B.
1	944,0	2,088	0,026	1,722	2,345	1,213	3,571	0,000	1,196	1,500	1,362	0,012	0,340	0,986	1,213	0,825	1,439	0,734	0,514	0,834	0,615	0,520	0,675	4,318
2	800,0	5,785	0,066	0,724	0,535	1,128	2,790	0,000	1,049	1,435	0,739	0,011	0,404	0,930	7,996	0,125	0,690	1,353	4,598	1,204	0,407	4,651	0,780	-0,278
3	670,0	0,565	0,026	1,322	1,604	1,213	1,530	0,000	0,787	1,952	1,213	0,045	0,793	0,649	0,428	2,338	1,681	0,824	0,193	0,771	0,907	0,202	1,307	4,272
4	1262,0	2,349	0,031	2,520	3,291	2,285	3,560	0,000	2,311	2,710	1,306	0,013	0,642	1,011	0,932	1,073	1,090	0,766	0,404	0,958	0,794	0,410	1,291	6,229
5	493,0	3,393	0,028	0,574	0,280	0,733	1,832	0,067	0,361	0,935	0,487	0,008	0,400	0,492	5,913	0,169	1,592	2,052	3,975	0,793	0,461	4,008	0,597	-4,687
6	358,0	4,045	0,003	0,299	0,041	0,395	1,478	0,300	0,180	0,105	0,137	0,001	0,267	0,457	13,512	0,074	1,661	7,279	11,880	0,776	0,345	11,887	0,389	-18,680
7	540,0	4,219	0,228	0,474	0,078	0,451	3,373	0,000	0,033	0,039	0,165	0,054	0,134	0,073	8,901	0,112	14,462	6,066	7,641	0,263	0,270	8,053	0,144	-118,490
8	1333	3,393	0,013	2,096	3,373	0,833	3,571	0,000	2,426	3,016	1,609	0,004	0,233	2,913	1,619	0,618	0,864	0,621	0,620	1,076	0,701	0,623	0,913	5,526
9	1199,0	2,349	0,018	1,896	3,373	1,067	4,112	0,000	2,245	1,968	1,779	0,008	0,259	2,105	1,239	0,807	0,845	0,562	0,446	1,088	0,597	0,449	0,805	5,501
10	2040,0	4,872	0,281	2,745	5,306	2,376	6,038	0,000	3,638	2,032	1,933	0,058	0,394	1,531	1,775	0,563	0,754	0,517	0,605	1,151	0,591	0,640	0,996	7,307
11	1414,0	3,697	0,018	2,495	2,797	2,371	3,841	0,000	0,262	4,338	1,121	0,005	0,617	0,111	1,482	0,675	9,515	0,892	0,699	0,324	0,750	0,702	0,685	3,053
12	1563,0	3,349	0,018	2,420	3,743	4,400	4,133	0,000	0,279	4,080	1,547	0,005	1,065	0,063	1,384	0,723	8,686	0,647	0,543	0,339	0,700	0,546	1,132	11,920
13	375,0	3,741	0,008	0,050	0,041	0,451	1,749	0,083	0,295	0,177	0,824	0,002	0,258	0,654	74,968	0,013	0,169	1,213	41,094	2,431	0,093	41,179	0,427	-9,251
14	1497,0	2,653	0,028	2,046	4,195	4,316	3,904	0,000	2,655	2,774	2,051	0,011	1,105	0,615	1,297	0,771	0,771	0,488	0,425	1,139	0,650	0,430	1,786	7,293
15	1250,0	2,958	0,026	1,946	3,373	2,849	3,852	0,000	2,114	1,968	1,733	0,009	0,740	0,742	1,520	0,658	0,920	0,577	0,556	1,042	0,634	0,561	1,289	5,756
16	1328,0	3,480	0,128	2,994	3,085	2,962	3,956	0,000	1,082	3,822	1,030	0,037	0,749	0,365	1,162	0,860	2,768	0,971	0,572	0,601	0,831	0,593	1,022	7,181
17	1263,0	3,654	0,102	3,094	2,550	2,539	4,216	0,000	0,901	2,903	0,824	0,028	0,602	0,355	1,181	0,847	3,432	1,213	0,647	0,540	0,814	0,666	0,816	5,768
18	1469,0	3,219	0,179	3,169	2,797	3,836	3,519	0,000	1,065	4,580	0,883	0,056	1,090	0,278	1,016	0,984	2,974	1,133	0,540	0,580	0,933	0,570	1,393	8,510
19	1214,0	3,871	0,102	2,894	1,645	2,426	4,112	0,000	0,885	2,242	0,568	0,026	0,590	0,365	1,338	0,748	3,270	1,759	0,853	0,553	0,791	0,875	0,805	4,605
20	1247,0	3,132	0,128	3,219	1,974	2,736	3,352	0,000	1,016	3,306	0,613	0,041	0,816	0,371	0,973	1,028	3,167	1,630	0,603	0,562	0,973	0,628	1,119	6,143
21	1269,0	2,958	0,307	2,520	3,414	2,398	3,945	0,000	0,672	4,564	1,355	0,104	0,608	0,280	1,174	0,852	3,750	0,738	0,498	0,516	0,742	0,550	0,778	7,219
22	947,0	2,044	0,102	2,096	2,180	1,918	3,716	0,000	0,590	2,129	1,040	0,050	0,516	0,308	0,975	1,025	3,552	0,961	0,478	0,531	0,683	0,502	0,675	5,458
23	506,0	0,696	0,051	1,747	0,576	0,733	0,906	0,000	0,344	2,564	0,330	0,073	0,810	0,469	0,399	2,509	5,075	3,033	0,300	0,444	1,549	0,322	1,190	3,430
24	1068,0	1,740	0,077	2,295	2,715	3,695	2,904	0,000	1,016	2,564	1,183	0,044	1,272	0,275	0,758	1,319	2,259	0,846	0,347	0,665	0,855	0,363	1,622	7,317
25	967,0	2,262	0,179	1,971	2,303	2,595	3,633	0,000	0,508	0,597	1,169	0,079	0,714	0,196	1,148	0,871	3,880	0,856	0,529	0,508	0,665	0,571	0,854	4,533
26	412,0	3,132	0,051	0,349	0,494	0,818	1,811	0,117	0,180	0,192	1,413	0,016	0,452	0,220	8,966	0,112	1,938	0,708	3,716	0,718	0,334	3,776	0,551	-11,116
27	592,0	1,174	0,051	1,821	0,658	0,649	2,249	0,000	0,344	1,710	0,361	0,044	0,289	0,531	0,645	1,551	5,292	2,768	0,474	0,435	0,869	0,494	0,442	2,282
28	764	1,957	0,077	1,796	1,398	1,128	3,841	0,000	0,229	0,497	0,778	0,039	0,294	0,203	1,090	0,918	7,829	1,285	0,613	0,357	0,602	0,637	0,353	0,390

1 Pozos con profundidad inferior a 75 metros
Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.
Sondeo de profundidad superior a 150 m.

I.C.: Índice catiónico
I.A.: Índice aniónico
I.C.B.: Índice de cambio de base

RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA. CARACTERIZACIÓN

RCH	Balance %	Proc. muestreo	Halita	Minerales disueltos (mmol/l)				SAR	ESR	MH
				Dolomita	Calcita/ Aragonito	Anhidrita	Sílice			
1	1,9	OMAMUESTRAS	0,0342	2,3450		0,7600		1,40	0,26	57,66
2	18,0	BOMBEO	0,5655	0,0000		1,4680		0,33	0,10	54,82
3	0,5	OMAMUESTRAS	0,0318	0,5350		0,6660		5,16	2,30	42,50
4	1,7	BOMBEO	0,0644	3,2910		1,4680		0,97	0,20	56,63
5	0,2	BOMBEO	0,0207	0,2800	0,0652	0,2290		3,67	1,99	32,77
6	12,8	BOMBEO	0,0111	0,0410	0,1439	0,1150		6,93	5,94	12,08
7	2,6	OMAMUESTRAS	0,0127	0,0780	0,3754	0,0210		5,68	3,82	14,15
8	1,3	BOMBEO	0,0636	3,3730		1,5410		1,45	0,31	61,68
9	0,7	BOMBEO	0,0509	3,3730		1,4260		1,02	0,22	64,01
10	2,4	OMAMUESTRAS	0,1154	5,3060		2,3110		1,72	0,30	65,91
11	1,9	BOMBEO	3,6973	2,7970		0,1670		1,61	0,35	52,86
12	10,8	BOMBEO		3,7430		0,1770				60,73
13	0,1	BOMBEO	0,0127			0,1870		12,40	20,55	45,19
14	1,9	BOMBEO	0,1217	4,1960		1,6870		1,90	0,38	67,22
15	0,2	BOMBEO	0,0804	3,3730		1,3430		1,28	0,28	63,41
16	4,6	BOMBEO	0,0835	3,0850		0,6870		1,41	0,29	50,75
17	6,4	BOMBEO	0,0716	2,5500		0,5730		1,54	0,32	45,19
18	0,1	OMAMUESTRAS	3,2188	2,7970		0,6770		1,32	0,27	46,89
19	3,1	BOMBEO	0,0684	1,6450	0,6873	0,5620		1,82	0,43	36,25
20	3,9	OMAMUESTRAS	0,0772	1,9740	0,5992	0,6450		1,37	0,30	38,02
21	3,8	OMAMUESTRAS	0,0676	3,4140		0,4270		1,21	0,25	57,53
22	0,2	BOMBEO	0,0541	2,1800		0,3750		0,99	0,24	50,99
23	2,2	OMAMUESTRAS	0,6960	0,5760	0,9526	0,2190		0,46	0,15	24,80
24	1,2	OMAMUESTRAS	1,7399	2,7150		0,6450		0,78	0,17	54,19
25	7,0	OMAMUESTRAS	2,2619	2,3040		0,3230		1,09	0,26	53,89
26	5,9	BOMBEO	0,0231	0,4940		0,1150		3,41	1,86	58,56
27	1,2	OMAMUESTRAS	0,0183	0,6580	0,9455	0,2190		0,75	0,24	26,54
28	2,8	BOMBEO	0,0318	1,3990	0,2523	0,1460		1,10	0,31	43,77



Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.
Sondeo de profundidad superior a 150 m.

SAR: Relación de absorción de sodio
ESR: Porcentaje de sodio intercambiable
MH: Riesgo de magnesificación

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA (B) 10 PUNTOS DE MUESTREO DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Fase preoperacional, 1999

RCH	Nº f	Nºo	Cond. (µS/cm)	Na (meq/l)	K (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Cl (meq/l)	HCO ₃ (meq/l)	CO ₃ (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	NO ₃ (meq/l)	Mg/Ca	K/Na	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	Na/Ca	Na/Cl	Ca/SO ₄	Ca/Mg	Na/(Ca+Mg)	SO ₄ /Ca	(Ca/HCO ₃) ²	I.C.	I.A.	I.C.B.
1	5	305	944,0	2,088	0,026	1,722	2,345	1,213	3,571	0,000	1,196	1,500	1,362	0,012	0,340	0,986	1,213	0,825	1,439	0,734	0,514	0,834	0,615	0,520	0,675	4,318
<u>2</u>	48b	G-1	800,0	5,785	0,066	0,724	0,535	1,128	2,790	0,000	1,049	1,435	0,739	0,011	0,404	0,930	7,996	0,125	0,690	1,353	4,598	1,204	0,407	4,651	0,780	-0,278
3	28	327	670,0	0,565	0,026	1,322	1,604	1,213	1,530	0,000	0,787	1,952	1,213	0,045	0,793	0,649	0,428	2,338	1,681	0,824	0,193	0,771	0,907	0,202	1,307	4,272
4	42b	234	1262,0	2,349	0,031	2,520	3,291	2,285	3,560	0,000	2,311	2,710	1,306	0,013	0,642	1,011	0,932	1,073	1,090	0,766	0,404	0,958	0,794	0,410	1,291	6,229
<u>5</u>	49	218	493,0	3,393	0,028	0,574	0,280	0,733	1,832	0,067	0,361	0,935	0,487	0,008	0,400	0,492	5,913	0,169	1,592	2,052	3,975	0,793	0,461	4,008	0,597	-4,687
6	53	227	358,0	4,045	0,003	0,299	0,041	0,395	1,478	0,300	0,180	0,105	0,137	0,001	0,267	0,457	13,512	0,074	1,661	7,279	11,880	0,776	0,345	11,887	0,389	-18,680
<u>7</u>	55	216	540,0	4,219	0,228	0,474	0,078	0,451	3,373	0,000	0,033	0,039	0,165	0,054	0,134	0,073	8,901	0,112	14,462	6,066	7,641	0,263	0,270	8,053	0,144	-118,490
8	62	205	1333	3,393	0,013	2,096	3,373	0,833	3,571	0,000	2,426	3,016	1,609	0,004	0,233	2,913	1,619	0,618	0,864	0,621	0,620	1,076	0,701	0,623	0,913	5,526
9	64	207	1199,0	2,349	0,018	1,896	3,373	1,067	4,112	0,000	2,245	1,968	1,779	0,008	0,259	2,105	1,239	0,807	0,845	0,562	0,446	1,088	0,597	0,449	0,805	5,501
10	71	229	2040,0	4,872	0,281	2,745	5,306	2,376	6,038	0,000	3,638	2,032	1,933	0,058	0,394	1,531	1,775	0,563	0,754	0,517	0,605	1,151	0,591	0,640	0,996	7,307
11	77	146	1414,0	3,697	0,018	2,495	2,797	2,371	3,841	0,000	0,262	4,338	1,121	0,005	0,617	0,111	1,482	0,675	9,515	0,892	0,699	0,324	0,750	0,702	0,685	3,053
12	85	133	1563,0	3,349	0,018	2,420	3,743	4,400	4,133	0,000	0,279	4,080	1,547	0,005	1,065	0,063	1,384	0,723	8,686	0,647	0,543	0,339	0,700	0,546	1,132	11,920
13	101	124	375,0	3,741	0,008	0,050	0,041	0,451	1,749	0,083	0,295	0,177	0,824	0,002	0,258	0,654	74,968	0,013	0,169	1,213	41,094	2,431	0,093	41,179	0,427	-9,251
14	109	116	1497,0	2,653	0,028	2,046	4,195	4,316	3,904	0,000	2,655	2,774	2,051	0,011	1,105	0,615	1,297	0,771	0,771	0,488	0,425	1,139	0,650	0,430	1,786	7,293
15	122	104Q	1250,0	2,958	0,026	1,946	3,373	2,849	3,852	0,000	2,114	1,968	1,733	0,009	0,740	0,742	1,520	0,658	0,920	0,577	0,556	1,042	0,634	0,561	1,289	5,756
16	126	95	1328,0	3,480	0,128	2,994	3,085	2,962	3,956	0,000	1,082	3,822	1,030	0,037	0,749	0,365	1,162	0,860	2,768	0,971	0,572	0,601	0,831	0,593	1,022	7,181
17	132	108	1263,0	3,654	0,102	3,094	2,550	2,539	4,216	0,000	0,901	2,903	0,824	0,028	0,602	0,355	1,181	0,847	3,432	1,213	0,647	0,540	0,814	0,666	0,816	5,768
18	139	69	1469,0	3,219	0,179	3,169	2,797	3,836	3,519	0,000	1,065	4,580	0,883	0,056	1,090	0,278	1,016	0,984	2,974	1,133	0,540	0,580	0,933	0,570	1,393	8,510
19	148	85	1214,0	3,871	0,102	2,894	1,645	2,426	4,112	0,000	0,885	2,242	0,568	0,026	0,590	0,365	1,338	0,748	3,270	1,759	0,853	0,553	0,791	0,875	0,805	4,605
20	149	80	1247,0	3,132	0,128	3,219	1,974	2,736	3,352	0,000	1,016	3,306	0,613	0,041	0,816	0,371	0,973	1,028	3,167	1,630	0,603	0,562	0,973	0,628	1,119	6,143
21	174	54	1269,0	2,958	0,307	2,520	3,414	2,398	3,945	0,000	0,672	4,564	1,355	0,104	0,608	0,280	1,174	0,852	3,750	0,738	0,498	0,516	0,742	0,550	0,778	7,219
22	196	20	947,0	2,044	0,102	2,096	2,180	1,918	3,716	0,000	0,590	2,129	1,040	0,050	0,516	0,308	0,975	1,025	3,552	0,961	0,478	0,531	0,683	0,502	0,675	5,458
23	198	18	506,0	0,696	0,051	1,747	0,576	0,733	0,906	0,000	0,344	2,564	0,330	0,073	0,810	0,469	0,399	2,509	5,075	3,033	0,300	0,444	1,549	0,322	1,190	3,430
24	199	19	1068,0	1,740	0,077	2,295	2,715	3,695	2,904	0,000	1,016	2,564	1,183	0,044	1,272	0,275	0,758	1,319	2,259	0,846	0,347	0,665	0,855	0,363	1,622	7,317
25	200	17	967,0	2,262	0,179	1,971	2,303	2,595	3,633	0,000	0,508	0,597	1,169	0,079	0,714	0,196	1,148	0,871	3,880	0,856	0,529	0,508	0,665	0,571	0,854	4,533
<u>26</u>	<u>212</u>	<u>29</u>	<u>412,0</u>	<u>3,132</u>	<u>0,051</u>	<u>0,349</u>	<u>0,494</u>	<u>0,818</u>	<u>1,811</u>	<u>0,117</u>	<u>0,180</u>	<u>0,192</u>	<u>1,413</u>	<u>0,016</u>	<u>0,452</u>	<u>0,220</u>	<u>8,966</u>	<u>0,112</u>	<u>1,938</u>	<u>0,708</u>	<u>3,716</u>	<u>0,718</u>	<u>0,334</u>	<u>3,776</u>	<u>0,551</u>	<u>-11,116</u>
27	217	4	592,0	1,174	0,051	1,821	0,658	0,649	2,249	0,000	0,344	1,710	0,361	0,044	0,289	0,531	0,645	1,551	5,292	2,768	0,474	0,435	0,869	0,494	0,442	2,282
28	218	33	764	1,957	0,077	1,796	1,398	1,128	3,841	0,000	0,229	0,497	0,778	0,039	0,294	0,203	1,090	0,918	7,829	1,285	0,613	0,357	0,602	0,637	0,353	0,390

1 Pozos con profundidad inferior a 75 metros

Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.

Sondeo de profundidad superior a 150 m.

I.C.: Índice catiónico

I.A.: Índice aniónico

I.C.B.: Índice de cambio de base

ANALISIS DE LOS DATOS

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

			Minerales disueltos (mmol/l)							
RCH	Balance %	Proc. muestreo	Halita	Dolomita	Calcita/ Aragonito	Anhidrita	Sílice	SAR	ESR	MH
1	1,9	OMAMUESTRAS	0,0342	2,3450		0,7600		1,40	0,26	57,66
2	18,0	BOMBEO	0,5655	0,0000		1,4680		0,33	0,10	54,82
3	0,5	OMAMUESTRAS	0,0318	0,5350		0,6660		5,16	2,30	42,50
4	1,7	BOMBEO	0,0644	3,2910		1,4680		0,97	0,20	56,63
5	0,2	BOMBEO	0,0207	0,2800	0,0652	0,2290		3,67	1,99	32,77
6	12,8	BOMBEO	0,0111	0,0410	0,1439	0,1150		6,93	5,94	12,08
7	2,6	OMAMUESTRAS	0,0127	0,0780	0,3754	0,0210		5,68	3,82	14,15
8	1,3	BOMBEO	0,0636	3,3730		1,5410		1,45	0,31	61,68
9	0,7	BOMBEO	0,0509	3,3730		1,4260		1,02	0,22	64,01
10	2,4	OMAMUESTRAS	0,1154	5,3060		2,3110		1,72	0,30	65,91
11	1,9	BOMBEO	3,6973	2,7970		0,1670		1,61	0,35	52,86
12	10,8	BOMBEO		3,7430		0,1770				60,73
13	0,1	BOMBEO	0,0127			0,1870		12,40	20,55	45,19
14	1,9	BOMBEO	0,1217	4,1960		1,6870		1,90	0,38	67,22
15	0,2	BOMBEO	0,0804	3,3730		1,3430		1,28	0,28	63,41
16	4,6	BOMBEO	0,0835	3,0850		0,6870		1,41	0,29	50,75
17	6,4	BOMBEO	0,0716	2,5500		0,5730		1,54	0,32	45,19
18	0,1	OMAMUESTRAS	3,2188	2,7970		0,6770		1,32	0,27	46,89
19	3,1	BOMBEO	0,0684	1,6450	0,6873	0,5620		1,82	0,43	36,25
20	3,9	OMAMUESTRAS	0,0772	1,9740	0,5992	0,6450		1,37	0,30	38,02
21	3,8	OMAMUESTRAS	0,0676	3,4140		0,4270		1,21	0,25	57,53
22	0,2	BOMBEO	0,0541	2,1800		0,3750		0,99	0,24	50,99
23	2,2	OMAMUESTRAS	0,6960	0,5760	0,9526	0,2190		0,46	0,15	24,80
24	1,2	OMAMUESTRAS	1,7399	2,7150		0,6450		0,78	0,17	54,19
25	7,0	OMAMUESTRAS	2,2619	2,3040		0,3230		1,09	0,26	53,89
26	5,9	BOMBEO	0,0231	0,4940		0,1150		3,41	1,86	58,56
27	1,2	OMAMUESTRAS	0,0183	0,6580	0,9455	0,2190		0,75	0,24	26,54
28	2,8	BOMBEO	0,0318	1,3990	0,2523	0,1460		1,10	0,31	43,77

	Sondeo de 75 a 150 m de profundidad.
	Sondeo de profundidad superior a 150 m.

SAR: Relación de absorción de sodio
ESR: Porcentaje de sodio intercambiable
MH: Riesgo de magnesificación

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

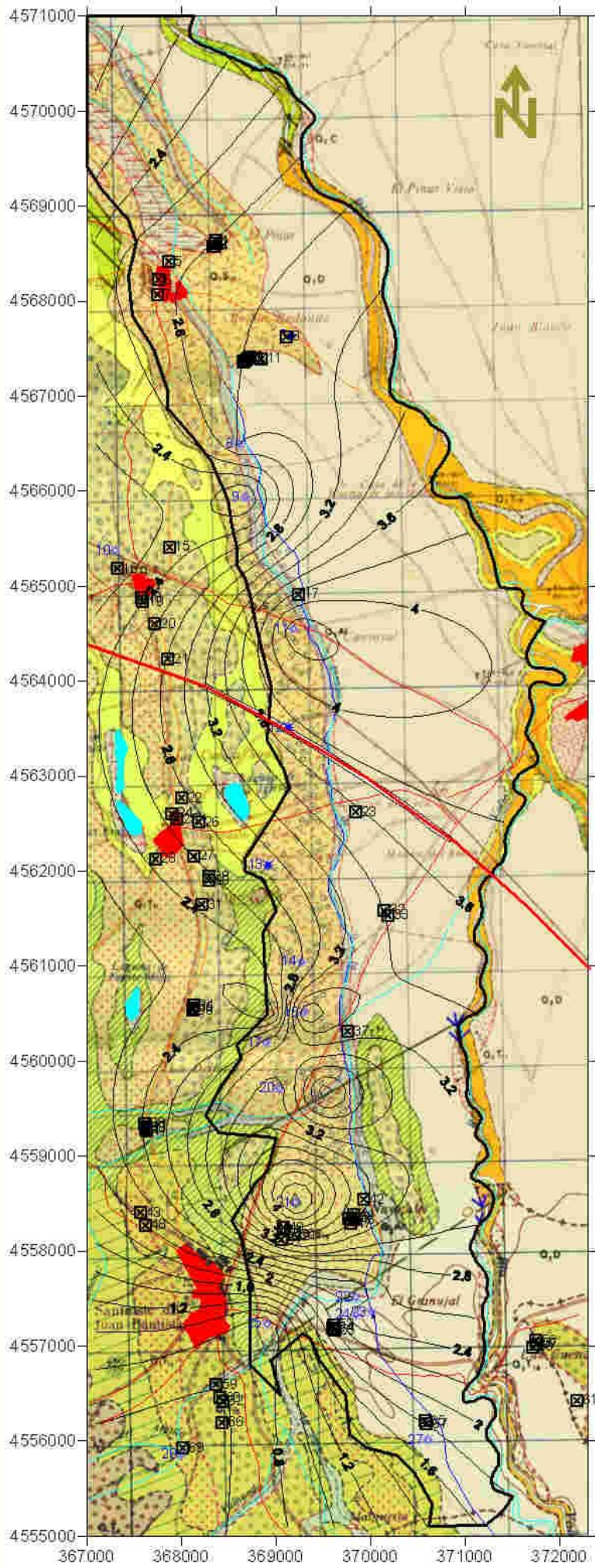
3.1.2.4. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA. MAPAS DE ISOCONTENIDOS” PARA EL ACUÍFERO SUPERFICIAL

- **Distribución de conductividad**
- **Distribución de la concentración de ión Cl^-**
- **Distribución de la concentración de ión NO_3^-**
- **Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)**
- **Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)**
- **Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$**
- **Distribución de ión $\text{SO}_4^{=}$**

3.1.2.5. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA. MAPAS DE ISORRELACIONES IÓNICAS

- **Relación iónica magnesio/calcio**
- **Relación iónica potasio/sodio**
- **Relación iónica cloruro/bicarbonato**
- **Relación iónica sulfato/cloruro**





LEYENDA MAPA BASE:

CUEPARIARIO	PLATOCUERO	CUEPARIARIO	PLATOCUERO	CUEPARIARIO	PLATOCUERO
CUATERNARIO	HOLOCENO	Q2 A1	Q2 L	Q2 C	Q2 D
CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Q1 T18	Q1 T16	Q1 T14	Q1 T12
CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Q1 T10	Q1 T8	Q1 T6	Q1 T4
CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Q1 T2	Q1 T0	Q1 T-2	Q1 T-4

- Q2 A1: Aluviones de arena y limo con o sin cantos rodados.
- Q2 L: Lodo de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q2 C: Canto de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q2 D: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T18: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T16: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T14: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T12: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T10: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T8: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T6: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T4: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T2: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T0: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T-2: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T-4: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T18: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T16: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T14: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T12: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T10: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T8: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T6: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T4: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T2: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T0: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T-2: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.
- Q1 T-4: Detritos de arena limosa con o sin cantos rodados.

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario
- Granjas

RCH-99 - PREOPERACIONAL

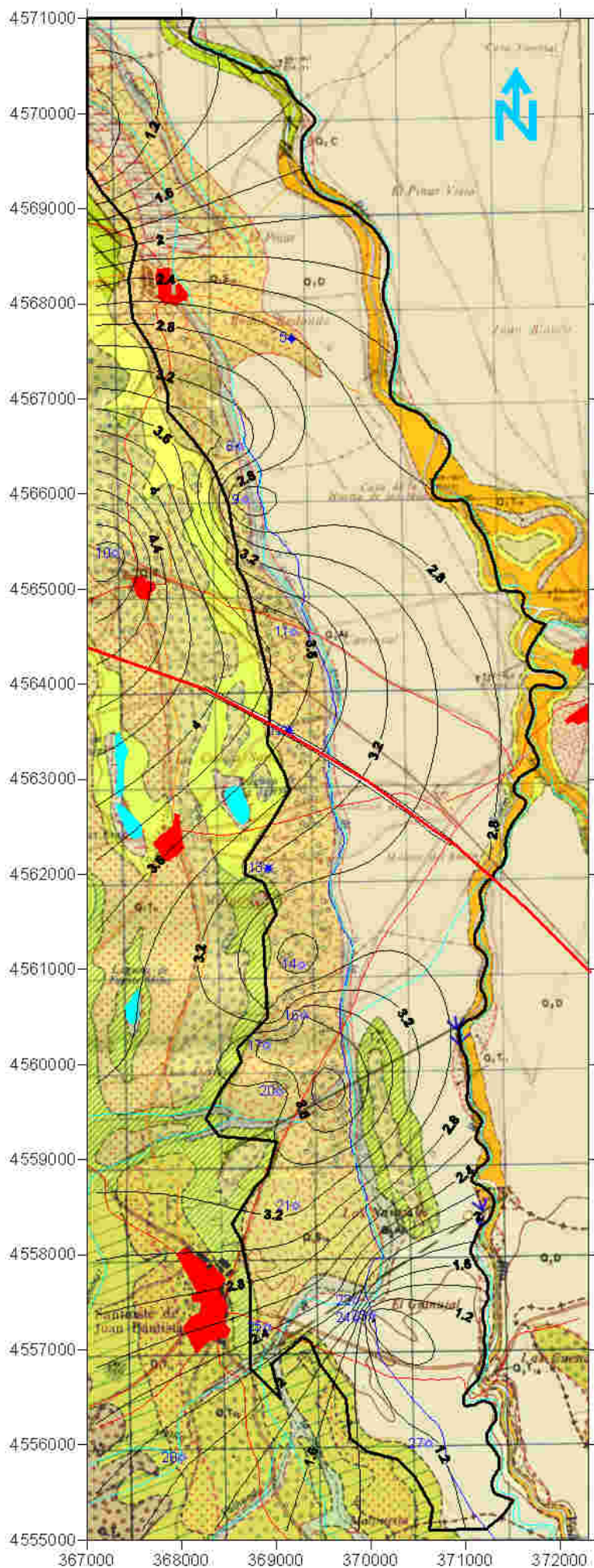
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

CUBETA DE SANTIUSTE CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS IÓN NITRATO

0 1000 2000 3000 4000
ESCALA 1:50.000






VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l



LEYENDA MAPA BASE:


[illegible][illegible]

LEYENDA:

-  Núcleo urbano
-  Red hidrográfica
-  Humedales
-  Carreteras/TAV
-  Envoltiente acuífero cuaternario

RCH-99 - PREOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

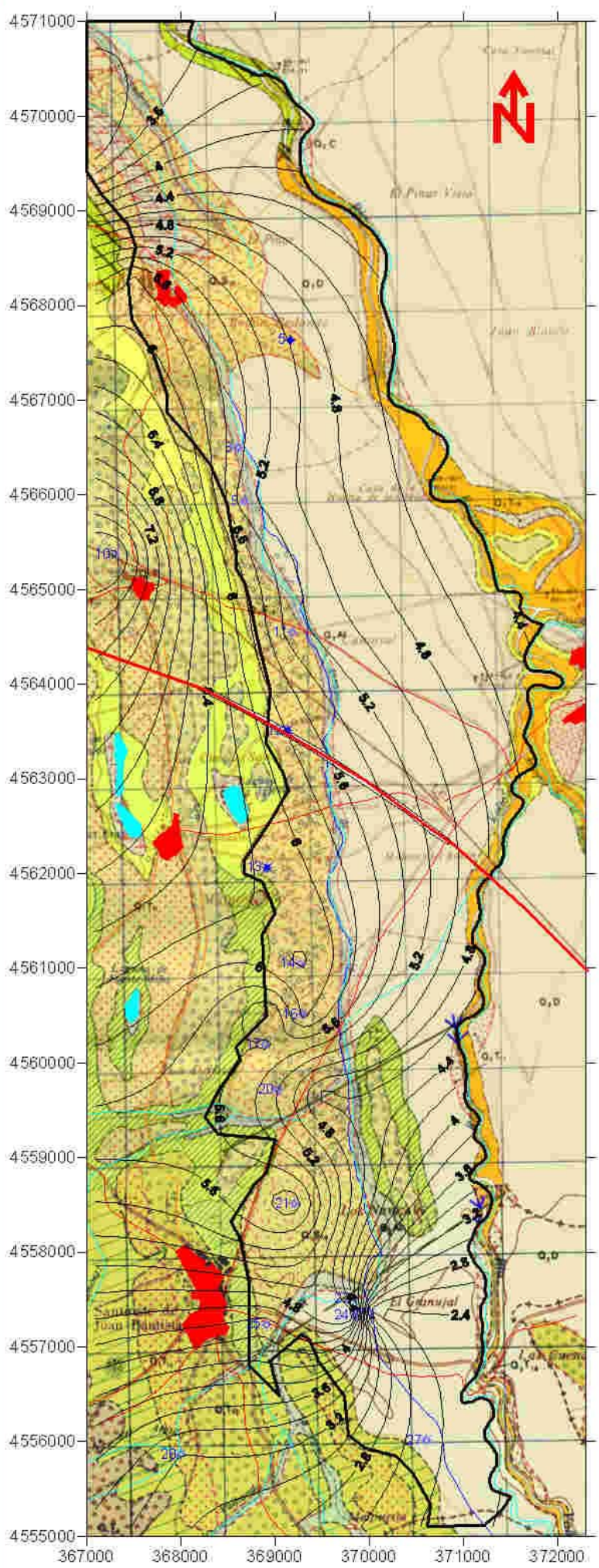
-  INFERIOR A 75 m.
 ENTRE 75 Y 150 m
 SUPERIOR A 150 m



ESCALA 1:50.000

CUBETA DE SANTIUSTE CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS IONES SODIO + POTASIO

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l



LEYENDA MAPA BASE:

Cuatrenario	Periodo	Formación	Descripción
Cuaternario	Holoceno	Q2 A1	Q2 L
		Q2 T18	Q2 C
		Q2 T19	Q2 D
		Q2 T20	Q2 E
	Pleistoceno	Q1 T1	Q1 T2
		Q1 T3	Q1 T4
		Q1 T5	Q1 T6
		Q1 T7	Q1 T8
	Greceniano	Q1 T9	Q1 T10
		Q1 T11	Q1 T12
		Q1 T13	Q1 T14
		Q1 T15	Q1 T16
Terciario	Mioceno	T B1	T B2
		T B3	T B4
	Plioceno	T B5	T B6
		T B7	T B8

- Q2 A1: Aluviales de arena y grava con coque de carbón vegetal.
- Q2 L: Lodo de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q2 C: Cascallos de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q2 D: Derrame de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q2 E: Erosión de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T1: Tercera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T2: Segunda de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T3: Primera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T4: Cuarta de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T5: Tercera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T6: Segunda de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T7: Primera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T8: Cuarta de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T9: Tercera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T10: Segunda de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T11: Primera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T12: Cuarta de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T13: Tercera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T14: Segunda de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T15: Primera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- Q1 T16: Cuarta de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B1: Tercera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B2: Segunda de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B3: Primera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B4: Cuarta de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B5: Tercera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B6: Segunda de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B7: Primera de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.
- T B8: Cuarta de arena y grava (aluviales) de origen local, con coque de carbón vegetal.

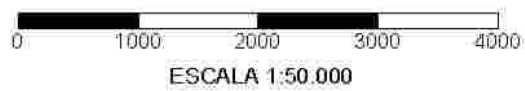
LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envoltura acuífera cuaternaria

RCH-99 - PREOPERACIONAL

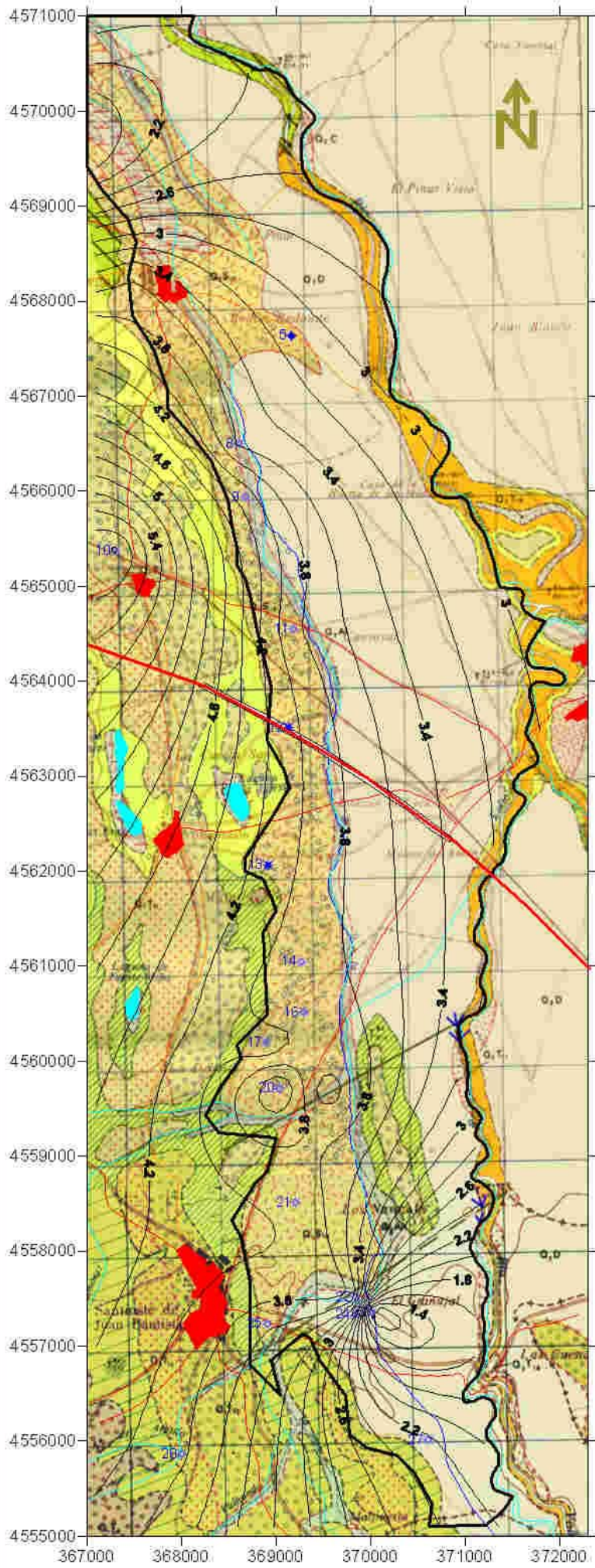
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

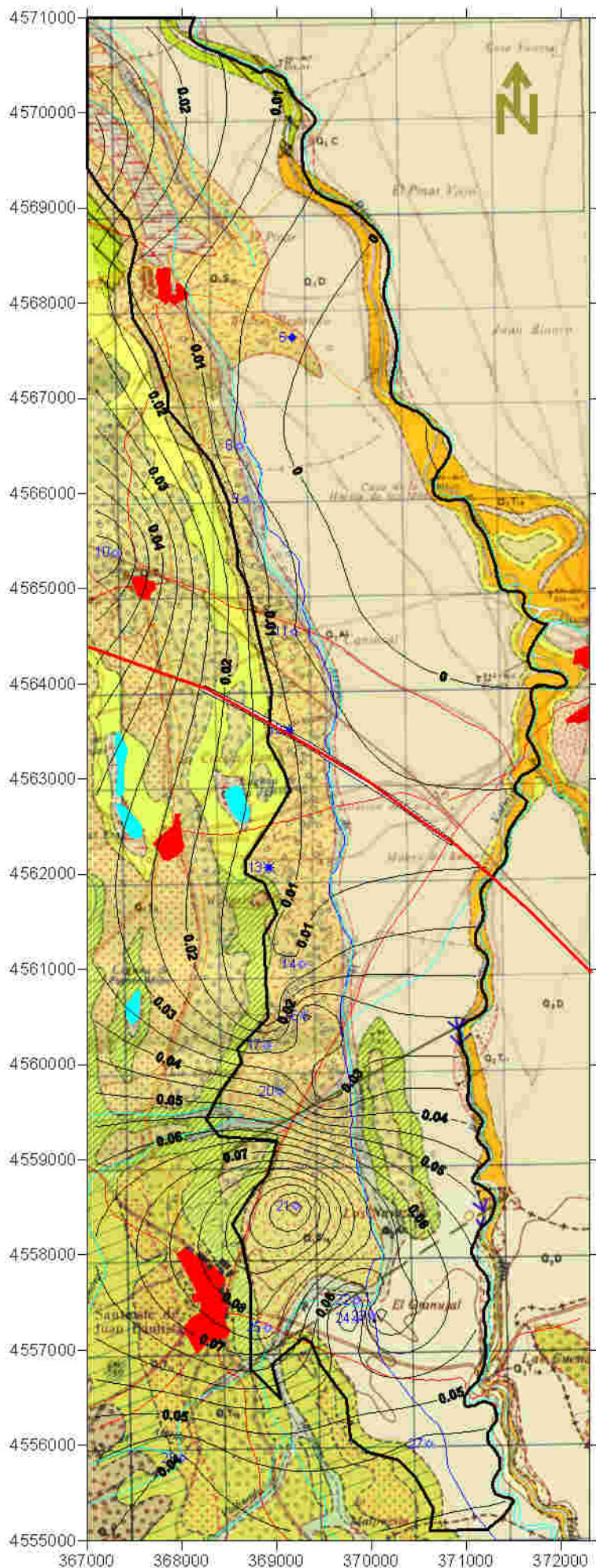
- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m



CUBETA DE SANTIUSTE CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS IÓNES CALCIO + MAGNESIO

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l





LEYENDA MAPA BASE:

CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	HOLOCENO	Q1 A1	Q1 A1
		Q1 B1	Q1 B1
		Q1 C1	Q1 C1
		Q1 D1	Q1 D1
	PLEISTOCENO	Q1 E1	Q1 E1
		Q1 F1	Q1 F1
		Q1 G1	Q1 G1
		Q1 H1	Q1 H1
	TERCIARIO	Q1 I1	Q1 I1
		Q1 J1	Q1 J1
		Q1 K1	Q1 K1
		Q1 L1	Q1 L1

- Q1 A1: Aluviales de arena y grava con coque de carbón.
- Q1 B1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 C1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 D1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 E1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 F1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 G1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 H1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 I1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 J1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 K1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.
- Q1 L1: Fácies de arena con coque de carbón y grava.

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envoltorio acuífero cuaternario

RCH-99 - PREOPERACIONAL

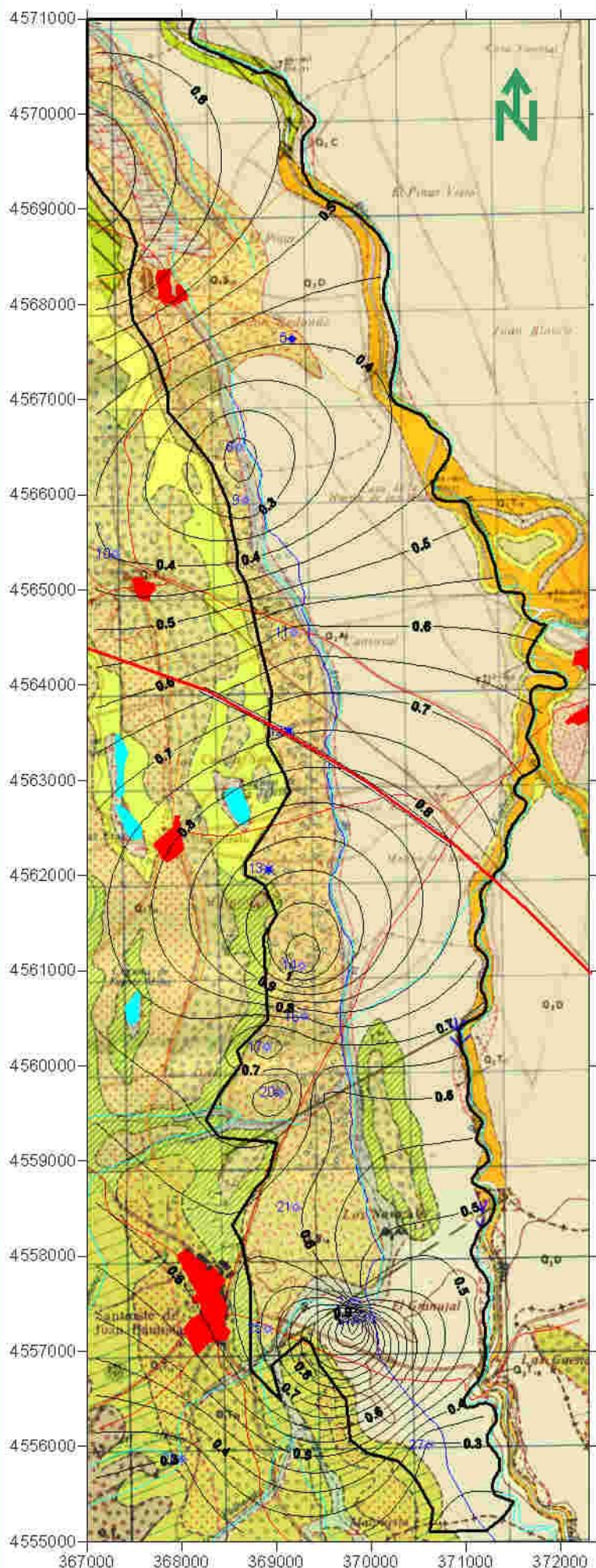
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m



CUBETA DE SANTIUSTE CARTOGRAFÍA DE ISORRELACIONES IÓNICAS POTASIO-SODIO

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l



0 1000 2000 3000 4000
ESCALA 1:50.000

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

3.1.3. RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA FASE SINOPERACIONAL (RCH-2003)

3.1.3.1. RESULTADOS ANALÍTICOS

3.1.3.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INESTABLES

3.1.3.3. CARACTERIZACIÓN



OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

ANÁLISIS QUÍMICOS. PERIODO SINOPERACIONAL. FEBRERO DE 2003

RCH 03	X	Y	Z	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO3(mg/l)	CO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	H2SiO3 (mg/l)	COND	pH	FACIES
1	366002	4571760	758,6	45	7	58	57	43	352	< 8	104	88	25	32,49	975	7,20	Mg-Ca-HCO3-SO4
2	366758	4569620	766,1	16	8	52	49	52	200	< 8	62	100	15	19,49	748	8,00	Mg-Ca-HCO3-NO3
3	367488	4568356	770,4	52	5	99	90	93	352	< 8	160	179	26	33,79	1310	7,90	Mg-Ca-HCO3-SO4
4	369959	4567090	773,6	36	6	182	60	100	329	< 8	118	228	24	31,19	1396	8,00	Ca-Mg-HCO3-NO3
5	369306	4566315	776,6	100	17	151	66	46	325	< 8	168	271	25	32,49	1486	7,40	Ca-Mg-Na-HCO3-NO3-SO
6	369753	4567100	776,2	87	9	4	1	14	256	9	11	2	2,3	2,99	474	8,60	Na-HCO3
7	369313	4562496	777,3	56	8	57	84	61	382	< 8	120	105	26	33,79	1096	8,20	Mg-Ca-HCO3-SO4
8	367302	4565377	793,6	106	116	102	166	174	568	< 8	443	116	32	41,59	2210	8,10	Mg-HCO3-SO4
9	368918	4564508	780,6	85	12	98	125	111	376	17	237	131	28	36,39	1488	8,40	Mg-Ca-Na-HCO3-SO4
10	370783	4562750	784,4	25	3	54	26	23	193	< 8	78	45	27	35,09	592	7,8	Ca-Mg-HCO3-SO4
11	369313	4562496	785,8	97	16	135	101	138	332	< 8	227	303	30	38,99	1729	8,00	Mg-Ca-Na-HCO3-NO3-SO
12	369254	4561547	788,4	71	51	49	90	97	341	17	187	245	6,4	8,32	1535	8,60	Mg-HCO3-NO3-SO4
13	369291	4560515	790,4	79	4	140	60	122	317	< 8	148	186	30	38,99	1437	7,90	Ca-Mg-Na-HCO3-Cl-SO4
14	369033	4559716	790,9	86	36	38	115	125	554	< 8	128	70	27	35,09	1389	8,00	Mg-Na-HCO3-Cl
15	369209	4558512	798,3	77	10	87	107	100	354	< 8	114	233	43	55,88	1414	7,80	Mg-Ca-Na-HCO3-NO3
16	369339	4558514	796,2	88	19	112	36	66	340	< 8	119	129	30	38,99	1147	7,80	Ca-Na-Mg-HCO3
17	369837	4557330	806,0	40	5	86	51	57	412	< 8	55	29	48	62,38	932	8,10	Ca-Mg-HCO3
18	368902	4557236	806,3	49	8	103	52	95	371	< 8	75	54	52	67,58	1063	8,00	Ca-Mg-HCO3-Cl
19	370606	4556014	801,0	12	2	55	7	20	112	< 8	31	79	28	36,39	456	7,50	Ca-HCO3-NO3
20	368002	4555865	832,7	46	4	47	33	65	303	< 8	41	24	19	24,69	734	8,10	Mg-Ca-Na-HCO3-Cl
21	369545	4559797	794,0	82	3	90	53	76	402	< 8	98	66	33	42,89	1119	7,80	Ca-Mg-Na-HCO3
22	370391	4559822	793,6	99	1	4	7	29	196	17	26	17	13	16,89	513	9,00	Na-HCO3
23	368631	4559366	799,1	82	0,5	0,5	0,5	14	135	24	17	2	9,7	12,61	353	9,70	Na-HCO3-CO3
24	368537	4556643	819,8	38	4	102	22	48	302	< 8	27	103	33	42,89	829	7,80	Ca-Mg-HCO3
25	370648	4560956	791,4	60	6	40	24	60	191	< 8	127	3	13	16,89	727	8,10	Na-Ca-Mg-HCO3-SO4-Cl
26	368926	4565642	775,0	43	13	157	41	29	205	< 8	80	378	15	19,49	1142	7,80	Ca-Mg-NO3-HCO3
27	369626	4563622	779,7	38	7	31	19	22	160	< 8	11	29	18	23,39	433	7,80	Na-Mg-Ca-HCO3

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

RCH. FASE OPERACIONAL
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INESTABLES

RCH 03	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	I z (cm)	N.E. MSNM	fecha	USO	Litolog	Cc (µS/cm)	pH c	Tª agua	Tª aire	Ox. Dis.	TSD	FECHA c	pH I	Cond. L (µS/cm)
rch 03-1	366002	4571760	758,6	P-S	7	n/a	70	n/a	feb-03	R	DETR	790	8,21	9,6	6	3,86	390,0	feb-03	7,20	975
rch 03-2	366758	4569620	766,1	P	9,1	n/a	50	n/a	feb-03	R	DETR	615	8,62	7,8	7	4,80	300,0	feb-03	8,00	748
rch 03-3	367488	4568356	770,4	P-S	N.D.	9,61	70	760,79	feb-03	R	DETR	1070	7,89	9	7	3,92	530,0	feb-03	7,90	1310
rch 03-4	369959	4567090	773,6	S	37	20,33	59	753,27	feb-03		DETR	855	7,84	13	6,9	4,01	420,0	feb-03	8,00	1396
rch 03-5	369306	4566315	776,6	Pi	20,57	11,13	14	765,47	feb-03		DETR	1120	7,26	12	4,3	3,31	550	feb-03	7,40	1486
rch 03-6	369753	4567100	776,2	S	>150	52,83	30	723,37	feb-03	C	DETR	370	8,69	14	5,1	3,00	1080,0	feb-03	8,6	474,0
rch 03-7	368696	4565440	777,3	P	n/a	n/a	0	n/a	feb-03	R	DETR	890	7,9	10	8,2	3,94	440,0	feb-03	8,20	1096
rch 03-8	367302	4565377	793,6	P	4,05	1,70	40	791,90	feb-03	C	DETR	1760	7,92	9	6,8	3,60	870,0	feb-03	8,10	2210
rch 03-9	368918	4564508	780,6	P-S		n/a		n/a	feb-03	R	DETR	1210	8,4	9	6,4	3,90	600	feb-03	8,40	1488
rch 03-10	370783	4562750	784,4	S	28	16,43	0	767,9	feb-03		DETR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	7,80	592
rch 03-11	369313	4562496	785,8	P-S		n/a		n/a	feb-03	R	DETR	1400	7,91	8	3,6	2,80	390,0	feb-03	8,00	1729
rch 03-12	369254	4561547	788,4	P		n/a		n/a	feb-03		DETR	1230	8,71	11	5,5	2,51	610,0	feb-03	8,60	1535
rch 03-13	369291	4560515	790,4	P	9,7	9,00	0	781,40	feb-03	C	DETR	1180	7,45	10	2	4,20	580,0	feb-03	7,90	1437
rch 03-14	369033	4559716	790,9	P	14,2	7,17	2	783,73	feb-03		DETR	1120	8,4	10	0	4,91	550,0	feb-03	8,00	1389
rch 03-15	369209	4558512	798,3	P	11,2	n/a	0	n/a	feb-03	C	DETR	1170	8,1	12	0	4,86	575,0	feb-03	7,80	1414
rch 03-16	369339	4558514	796,2	Pi	20	8,92	19	787,28	feb-03		DETR	945	7,9	9,5	1	4,78	470	feb-03	7,80	1147
rch 03-17	369837	4557330	806,0	P	17	6,61	0	799,39	feb-03	R	DETR	820	8,3	10	5	0,036	400,0	feb-03	8,10	932
rch 03-18	368902	4557236	806,3	P	9	3,44	100	802,86	feb-03	R	DETR	890	7,9	7,5	3,5	N/A	440,0	feb-03	8,00	1063
rch 03-19	370606	4556014	801,0	P	13,9	8,39	-300	792,61	feb-03	C	DETR	390	8,1	7	4	N/A	180,0	feb-03	7,50	456
rch 03-20	368002	4555865	832,7	P	10,2	1,06	40	831,64	feb-03	R	DETR	630	7,9	10	-1	N/A	31	feb-03	8,10	734
rch 03-21	369545	4559797	794,0	P		n/a		n/a	feb-03		DETR	920	8,2	10	1	3,69	450	feb-03	7,80	1119
rch 03-22	370391	4559822	793,6	S	>100	41,92	0	751,68	feb-03		DETR	440	9,4	13,5	3	4,35	210	feb-03	9,00	513
rch 03-23	368631	4559366	799,1	S	>200	61,23	34	737,87	feb-03		DETR	290	9,9	11	1	3,04	140	feb-03	9,70	353
rch 03-24	368537	4556643	819,8	M	0		0		feb-03		DETR	760	7,65				370	mar-03	7,80	829
rch 03-25	370648	4560956	791,4	Pi	20,9	17,53	9	773,87	feb-03		DETR	920	7,27	12	3	3,66	460	feb-03	8,10	727
rch 03-26	368926	4565642	775,0	Pi	20	1,55	0	773,45	feb-03		DETR	1010	7	9,7	13	N/A	N/A	jun-02	7,80	1142
rch 03-27	369626	4563622	779,7	Pi	23	1,93	20	777,77	feb-03		DETR	940	7,1	9,7	13	N/A	N/A	jun-02	7,80	433

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

RCH. FASE OPERACIONAL 2003
CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS (1)

RCH 03	Halita(mg/l)	Silvita(mg/l)	calcita(mg/l)	Dolomita(mg/l)	Anhidrita(mg/l)	Cuarzo(mg/l)	Feldespat(mg/l)	Halita (mmol/l)	Silvita (mmol/l)	calcita (mmol/l)	Dolomita (mmol/l)	Anhidrita (mmol/l)	Cuarzo (mmol/l)	Feldespat (mmol/l)	SAR	ESR	MH	Balance %
rch 03-1	60,48	13,347		67,087	147,464	19,21	83,882	1,0338	0,1801		0,364	1,083	0,32	0,32	1,01	0,26	61,84	-4,18%
rch 03-2	40,713	15,253		120,024	87,911	11,526	50,329	0,696	0,2058		0,652	0,645	0,192	0,192	0,38	0,11	60,84	-0,80%
rch 03-3	132,318	9,533		148,084	226,868	19,978	87,237	2,2619	0,1287		0,804	1,666	0,333	0,333	0,91	0,18	59,98	0,42%
rch 03-4	91,605	11,44	84,519	454,381	167,315	18,441	80,527	1,5659	0,1544	0,8452	2,468	1,228	0,307	0,307	0,59	0,11	35,21	4,62%
rch 03-5	50,469	32,413		371,603	238,211	19,21	83,882	0,8627	0,4374		2,018	1,749	0,32	0,32	1,71	0,34	41,88	10,10%
rch 03-6	9,636	17,16			15,597	1,767	7,717	0,1647	0,2316			0,115	0,029	0,029	10,08	13,43	29,19	-0,0906
rch 03-7	88,685	15,253		31,828	170,151	19,978	87,237	1,516	0,2058		0,173	1,249	0,333	0,333	1,1	0,25	70,84	0,90%
rch 03-8	113,558	221,174			628,14	24,588	107,369	1,9412	2,9848			4,612	0,409	0,41	1,51	0,25	72,85	1,96%
rch 03-9	165,204	22,88			336,048	21,515	93,948	2,824	0,3088			2,467	0,358	0,359	1,34	0,24	67,77	6,29%
rch 03-10	33,463	5,72		98,545	110,598			0,572	0,0772		0,535	0,812			0,7	0,22	44,25	-1,35%
rch 03-11	203,771	30,507		185,031	321,868	23,052	100,658	3,4833	0,4117		1,005	2,363	0,384	0,384	1,54	0,28	55,23	1,88%
rch 03-12	83,753	97,24			265,152	4,918	21,474	1,4317	1,3123			1,947	0,082	0,082	1,39	0,31	75,18	-8,05%
rch 03-13	195,324	7,627		359,408	209,853	23,052	100,658	3,3389	0,1029		1,952	1,541	0,384	0,384	1,41	0,29	41,4	2,46%
rch 03-14	152,397	68,64			181,494	20,746	90,592	2,6051	0,9263			1,333	0,345	0,346	1,57	0,33	83,3	-1,18%
rch 03-15	150,046	19,067		181,127	161,643	33,04	144,277	2,5649	0,2573		0,984	1,187	0,55	0,551	1,31	0,25	66,97	6,33%
rch 03-16	80,478	36,227	7,475	272,629	168,733	23,052	100,658	1,3757	0,4889	0,0748	1,481	1,239	0,384	0,384	1,85	0,45	34,64	3,51%
rch 03-17	86,573	9,533		289,612	77,986	36,882	161,053	1,4799	0,1287		1,573	0,573	0,614	0,615	0,84	0,21	49,44	1,88%
rch 03-18	124,685	15,253		329,367	106,344	39,956	174,474	2,1314	0,2058		1,789	0,781	0,665	0,666	0,98	0,23	45,43	2,44%
rch 03-19	30,009	3,813	76,234	53,011	43,956	21,515	93,948	0,513	0,0515	0,7623	0,288	0,323	0,358	0,359	0,41	0,16	17,34	-5,19%
rch 03-20	101,27	7,627		137,306	58,135	14,599	63,75	1,7311	0,1029		0,746	0,427	0,243	0,243	1,26	0,4	53,65	-5,77%
rch 03-21	120,917	5,72		225,572	138,956	25,357	110,724	2,067	0,0772		1,225	1,02	0,422	0,423	1,7	0,4	49,26	2,70%
rch 03-22	46,356	1,907			36,866	9,989	43,619	0,7924	0,0257			0,271	0,166	0,166	6,92	5,55	74,26	-0,029
rch 03-23	22,353	0,953			24,105	7,453	32,546	0,3821	0,0129			0,177	0,124	0,124	19,62	53,97	62,25	-0,0199
rch 03-25	90,027	11,44			180,076	9,989	43,619	1,5389	0,1544			1,322	0,166	0,166	1,85	0,66	49,73	-5,49%
rch 03-26	28,402	24,787	139,917	310,494	113,434	11,526	50,329	0,4855	0,3345	1,3992	1,687	0,833	0,192	0,192	0,79	0,17	30,1	5,80%
rch 03-27	25,828	13,347		121,31	15,597	13,831	60,395	0,4415	0,1801		0,659	0,115	0,23	0,231	1,33	0,53	50,26	11,28%

Sondeo de profundidad inferior a 50 m

Sondeo de profundidad superior a 50 m

ESR Porcentaje de sodio intercambiable

MH Riesgo de magnesificación

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

RCH. FASE OPERACIONAL 2003
CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS (2)

RCH 03	Cond. (µS/cm)	pH	Na (meq/l)	K (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Na+K	Ca+Mg	Cl (meq/l)	HCO ₃ (meq/l)	CO ₃ (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	NO ₃ (meq/l)	Mg/Ca	K/Na	Cl/HCO ₃	SO ₄ /Cl	Na/Ca	Na/Cl	Ca/SO ₄	Ca/Mg	Na/(Ca+Mg)	SO ₄ /Ca	(Ca/HCO ₃) ²	I.C.	I.A.	I.C.B.
rch 03-1	975	7,20	1,96	0,18	2,89	4,69	2,14	7,58	1,21	5,77	0,00	2,17	1,42	1,620	0,091	0,210	1,785	0,676	1,479	1,337	0,617	0,258	0,865	0,631	0,282	0,586	6,762
rch 03-2	748	8,00	0,70	0,20	2,59	4,03	0,90	6,63	1,47	3,28	0,00	1,29	1,61	1,553	0,294	0,447	0,880	0,268	3,728	2,010	0,644	0,105	0,705	0,856	0,136	0,841	5,329
rch 03-3	1310	7,90	2,26	0,13	4,94	7,40	2,39	12,34	2,62	5,77	0,00	3,33	2,89	1,499	0,057	0,455	1,270	0,458	2,184	1,483	0,667	0,183	0,821	0,902	0,194	1,032	8,726
rch 03-4	1396	8,00	1,57	0,15	9,08	4,94	1,72	14,02	2,82	5,39	0,00	2,46	3,68	0,543	0,098	0,523	0,871	0,172	5,800	3,697	1,840	0,112	0,520	1,416	0,123	0,979	9,518
rch 03-5	1486	7,40	4,35	0,43	7,53	5,43	4,78	12,96	1,30	5,33	0,00	3,50	4,37	0,721	0,100	0,244	2,696	0,577	1,732	2,154	1,388	0,336	0,681	1,260	0,369	0,900	8,700
rch 03-6	474	8,60	3,78	0,23	0,20	0,08	4,01	0,28	0,39	4,20	0,30	0,23	0,03	0,412	0,061	0,094	0,580	18,960	0,053	0,872	2,426	13,426	1,071	0,131	14,243	0,149	-11,577
rch 03-7	1096	8,20	2,44	0,20	2,84	6,91	2,64	9,75	1,72	6,26	0,00	2,50	1,69	2,429	0,084	0,275	1,452	0,856	1,168	1,138	0,412	0,250	0,937	0,591	0,271	0,674	7,586
rch 03-8	2210	8,10	4,61	2,97	5,09	13,66	7,58	18,75	4,91	9,31	0,00	9,22	1,87	2,683	0,643	0,527	1,879	0,906	1,104	0,552	0,373	0,246	1,346	0,669	0,404	1,518	10,890
rch 03-9	1488	8,40	3,70	0,31	4,89	10,28	4,00	15,17	3,13	6,16	0,57	4,93	2,11	2,103	0,083	0,508	1,576	0,756	1,323	0,991	0,476	0,244	1,005	0,857	0,264	1,309	8,098
rch 03-10	592	7,80	1,09	0,08	2,69	2,14	1,16	4,83	0,65	3,16	0,00	1,62	0,73	0,794	0,071	0,205	2,503	0,404	2,478	1,659	1,260	0,225	0,776	0,899	0,241	0,719	3,571
rch 03-11	1729	8,00	4,22	0,41	6,74	8,31	4,63	15,05	3,89	5,44	0,00	4,73	4,89	1,233	0,097	0,715	1,214	0,626	1,597	1,425	0,811	0,280	0,838	1,153	0,308	1,584	10,172
rch 03-12	1535	8,60	3,09	1,30	2,45	7,40	4,39	9,85	2,74	5,59	0,57	3,89	3,95	3,028	0,422	0,490	1,423	1,263	0,792	0,628	0,330	0,314	1,262	0,576	0,446	1,186	9,115
rch 03-13	1437	7,90	3,44	0,10	6,99	4,94	3,54	11,92	3,44	5,20	0,00	3,08	3,00	0,707	0,030	0,662	0,895	0,492	2,033	2,267	1,415	0,288	0,664	1,218	0,297	1,255	8,164
rch 03-14	1389	8,00	3,74	0,92	1,90	9,46	4,66	11,36	3,53	9,08	0,00	2,67	1,13	4,989	0,246	0,388	0,756	1,973	0,507	0,712	0,200	0,329	1,186	0,352	0,410	0,682	9,782
rch 03-15	1414	7,80	3,35	0,26	4,34	8,80	3,61	13,14	2,82	5,80	0,00	2,37	3,76	2,028	0,076	0,486	0,841	0,772	1,296	1,829	0,493	0,255	0,739	0,824	0,274	0,895	9,229
rch 03-16	1147	7,80	3,83	0,49	5,59	2,96	4,31	8,55	1,86	5,57	0,00	2,48	2,08	0,530	0,127	0,334	1,331	0,685	1,460	2,256	1,887	0,448	0,666	1,002	0,505	0,779	6,663
rch 03-17	932	8,10	1,74	0,13	4,29	4,20	1,87	8,49	1,61	6,75	0,00	1,15	0,47	0,978	0,073	0,238	0,712	0,405	2,466	3,748	1,023	0,205	0,517	0,739	0,220	0,408	6,993
rch 03-18	1063	8,00	2,13	0,20	5,14	4,28	2,34	9,42	2,68	6,08	0,00	1,56	0,87	0,832	0,096	0,441	0,583	0,415	2,411	3,291	1,202	0,226	0,551	0,894	0,248	0,698	7,171
rch 03-19	456	7,50	0,52	0,05	2,74	0,58	0,57	3,32	0,56	1,84	0,00	0,65	1,27	0,210	0,098	0,307	1,144	0,190	5,258	4,252	4,766	0,157	0,485	1,308	0,173	0,659	3,096
rch 03-20	734	8,10	2,00	0,10	2,35	2,71	2,10	5,06	1,83	4,97	0,00	0,85	0,39	1,158	0,051	0,369	0,466	0,853	1,172	2,747	0,864	0,395	0,603	0,606	0,416	0,541	5,037
rch 03-21	1119	7,80	3,57	0,08	4,49	4,36	3,64	8,85	2,14	6,59	0,00	2,04	1,06	0,971	0,022	0,325	0,952	0,794	1,259	2,201	1,030	0,403	0,674	0,775	0,412	0,635	6,918
rch 03-22	513	9	4,31	0,03	0,20	0,58	4,33	0,78	0,82	3,21	0,57	0,54	0,27	2,885	0,006	0,255	0,662	21,575	0,046	0,369	0,347	5,553	1,647	0,157	5,586	0,423	-3,005
rch 03-23	353	9,70	3,57	0,01	0,02	0,04	3,58	0,07	0,39	2,21	0,80	0,35	0,03	1,649	0,004	0,178	0,896	142,962	0,007	0,070	0,607	53,977	3,766	0,050	54,171	0,338	-6,753
rch 03-24	829	7,80	1,65	0,10	5,09	1,81	1,76	6,90	1,35	4,95	0,00	0,56	1,66	0,356	0,062	0,274	0,415	0,325	3,079	9,054	2,812	0,240	0,332	1,019	0,254	0,387	5,897
rch 03-25	727	8,10	2,61	0,15	2,00	1,97	2,76	3,97	1,69	3,13	0,00	2,64	0,05	0,989	0,059	0,541	1,562	1,308	0,765	0,755	1,011	0,657	1,151	0,741	0,696	1,385	2,774
rch 03-26	1142	7,80	1,87	0,33	7,83	3,37	2,20	11,21	0,82	3,36	0,00	1,67	6,10	0,431	0,178	0,243	2,036	0,239	4,188	4,704	2,323	0,167	0,461	1,758	0,197	0,739	8,625
rch 03-27	433	7,80	1,65	0,18	1,55	1,56	1,83	3,11	0,62	2,62	0,00	0,23	0,47	1,010	0,108	0,237	0,369	1,069	0,936	6,754	0,990	0,532	0,385	0,703	0,589	0,324	-2,200

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

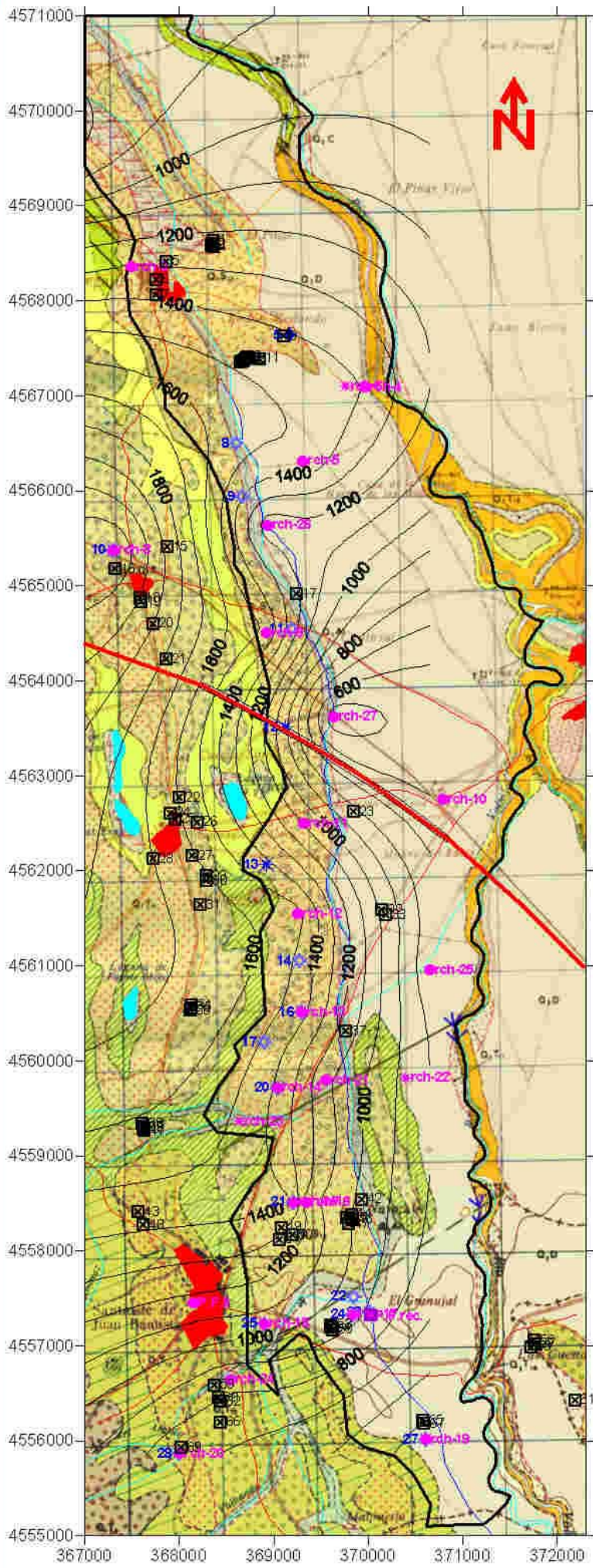
3.1.3.4. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA. MAPAS DE ISOCONTENIDOS” PARA EL ACUÍFERO SUPERFICIAL.

- **Distribución de conductividad**
- **Distribución de la concentración de ion Cl^-**
- **Distribución de la concentración de ion NO_3^-**
- **Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)**
- **Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)**
- **Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$**
- **Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$**

3.1.3.5. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA . MAPAS DE ISORRELACIONES IÓNICAS

- **Relación iónica magnesio/calcio**
- **Relación iónica potasio/sodio**
- **Relación iónica cloruro/bicarbonato**
- **Relación iónica sulfato/cloruro**





LEYENDA MAPA BASE:

CIVILIZACIÓN	PERIODO	SUBPERIODO	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	PLEISTOCENO	SUPERIOR	Q2 A1	Aluviales de arena y limo con o sin materia orgánica
			Q2 A2	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q2 C	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
		MEDIO	Q1 S16	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q1 S17	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q1 S18	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
	HOLOCENO	SUPERIOR	Q1 T1	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q1 T2	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q1 T3	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
		MEDIO	Q1 T4	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q1 T5	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			Q1 T6	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
	TERCIARIO	SUPERIOR	T Bc10/11	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			T Bc11/12	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			T Bc12/13	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
		MEDIO	T Bc14/15	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			T Bc16/17	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica
			T Bc18/19	Aluviales de arena, limo y arcilla con poca materia orgánica

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Húmedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífera cuaternario
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas

RCH-99 - PREOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

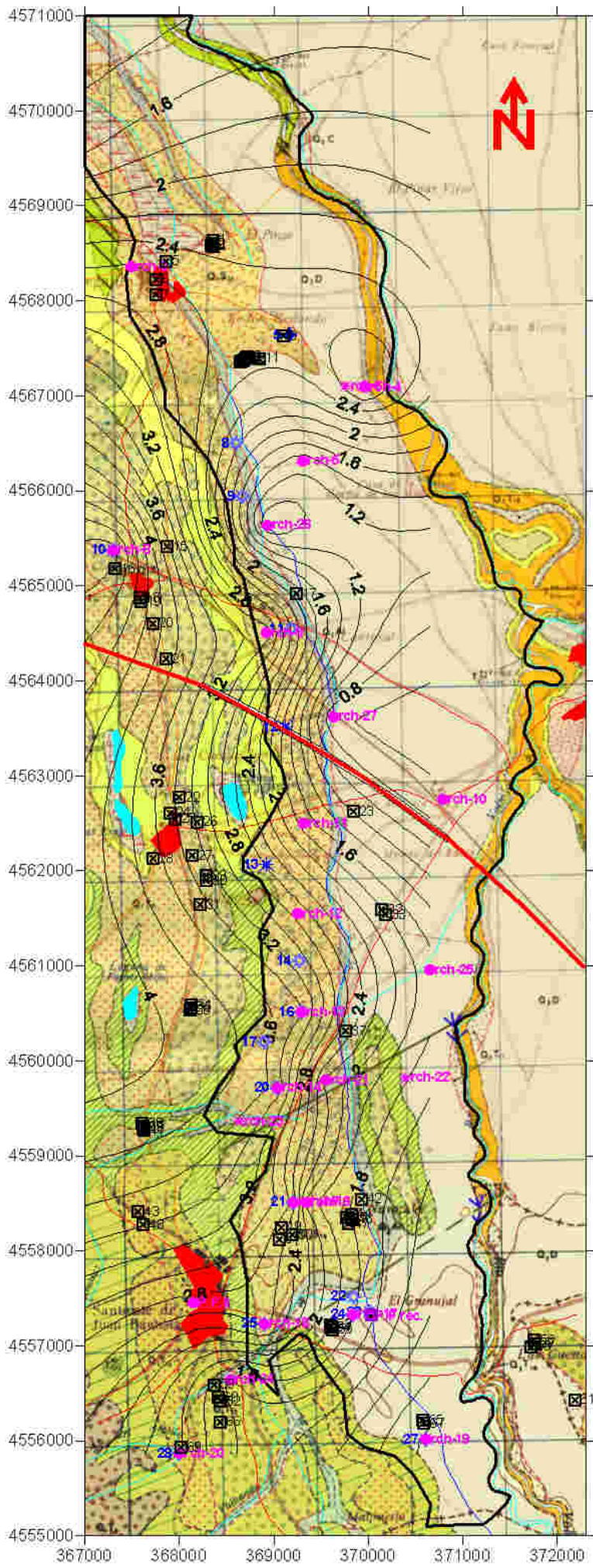
- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m

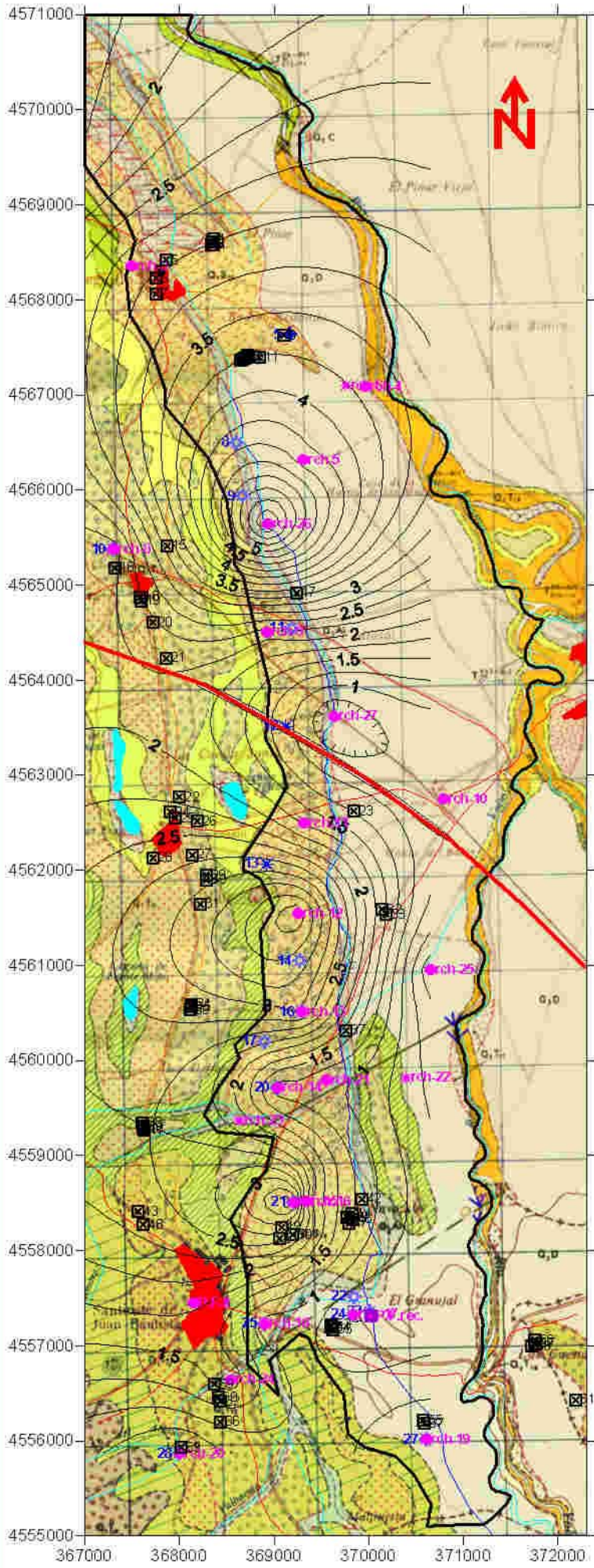


ESCALA 1:50.000

CUBETA DE SANTIUSTE CARTOGRAFÍA DE ISOCONDUCTIVIDADES

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN MICROS/CM





LEYENDA MAPA BASE:

CLASIFICACION	DESCRIPCION	SIMBOLO	DESCRIPCION
CUATERNARIO	Q2 A1	Q2 A1	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q2 T18	Q2 T18	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q2 C	Q2 C	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q2 D	Q2 D	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
TERCIARIO	Q1 S16	Q1 S16	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T4	Q1 T4	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T12	Q1 T12	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 S13	Q1 S13	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
SECUNDARIO	Q1 T11	Q1 T11	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T10	Q1 T10	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T9	Q1 T9	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T8	Q1 T8	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
PRIMARIO	Q1 T7	Q1 T7	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T6	Q1 T6	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T5	Q1 T5	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T4	Q1 T4	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
CUATERNARIO	Q1 T3	Q1 T3	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T2	Q1 T2	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T1	Q1 T1	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	Q1 T0	Q1 T0	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
TERCIARIO	T18/C11	T18/C11	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C12	T18/C12	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C13	T18/C13	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C14	T18/C14	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
SECUNDARIO	T18/C15	T18/C15	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C16	T18/C16	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C17	T18/C17	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C18	T18/C18	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
PRIMARIO	T18/C19	T18/C19	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C20	T18/C20	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C21	T18/C21	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.
	T18/C22	T18/C22	Aluviones de arena y limo con arcilla roja y gris.

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas

RCH-99 - PREOPERACIONAL

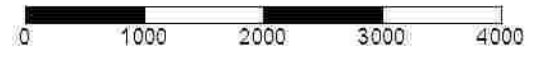
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

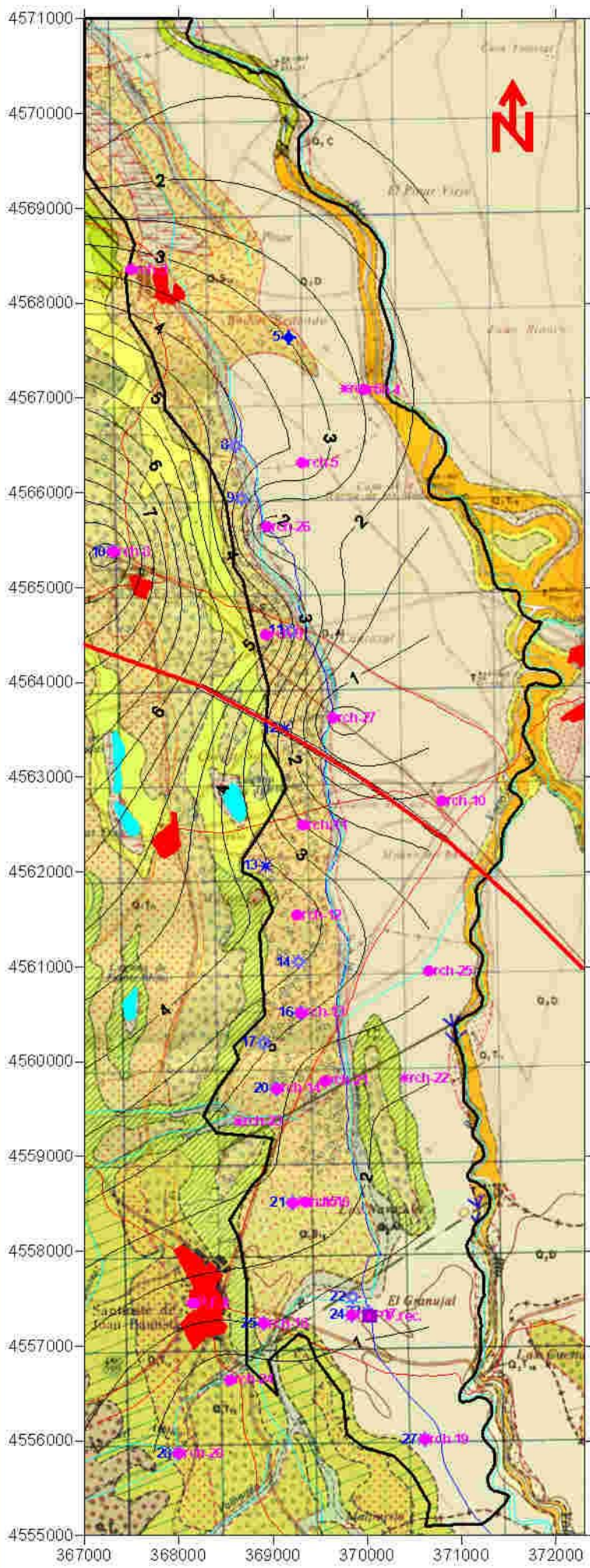
- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m



ESCALA 1:50.000

CUBETA DE SANTIUSTE CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS IÓN NITRATO

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l



CUBETA DE SANTIUSTE **CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS** **IÓN SULFATO**

LEYENDA MAPA BASE:

CATEGORÍA	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	PACIFICOS	Q2 A1 - Q2 A
		Q2 T19 - Q2 C
		Q2 D
		Q2 T19
		Q1 S16
		Q1 T4
		Q1 S14
		Q1 T12
		Q1 S13
		Q1 T12
		Q1 S12
CUATERNARIO	PACIFICOS	Q1 T11
		Q1 T10
		Q1 T9
		Q1 T8
		Q1 T7
		Q1 T6
		Q1 T5
		Q1 T4
		Q1 T3
		Q1 T2
CUATERNARIO	PACIFICOS	T B2/C11
		T B2/C12
		T B2/C13
		T B2/C14
		T B2/C15
		T B2/C16
		T B2/C17
		T B2/C18
		T B2/C19
		T B2/C20

LEYENDA:

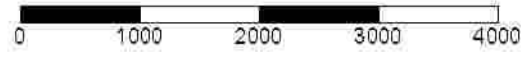
- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario
- Cabecera del caz de recarga artificial

RCH-99 - PREOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:	
INFERIOR A 75 m.	●
ENTRE 75 Y 150 m	✱
SUPERIOR A 150 m	✦

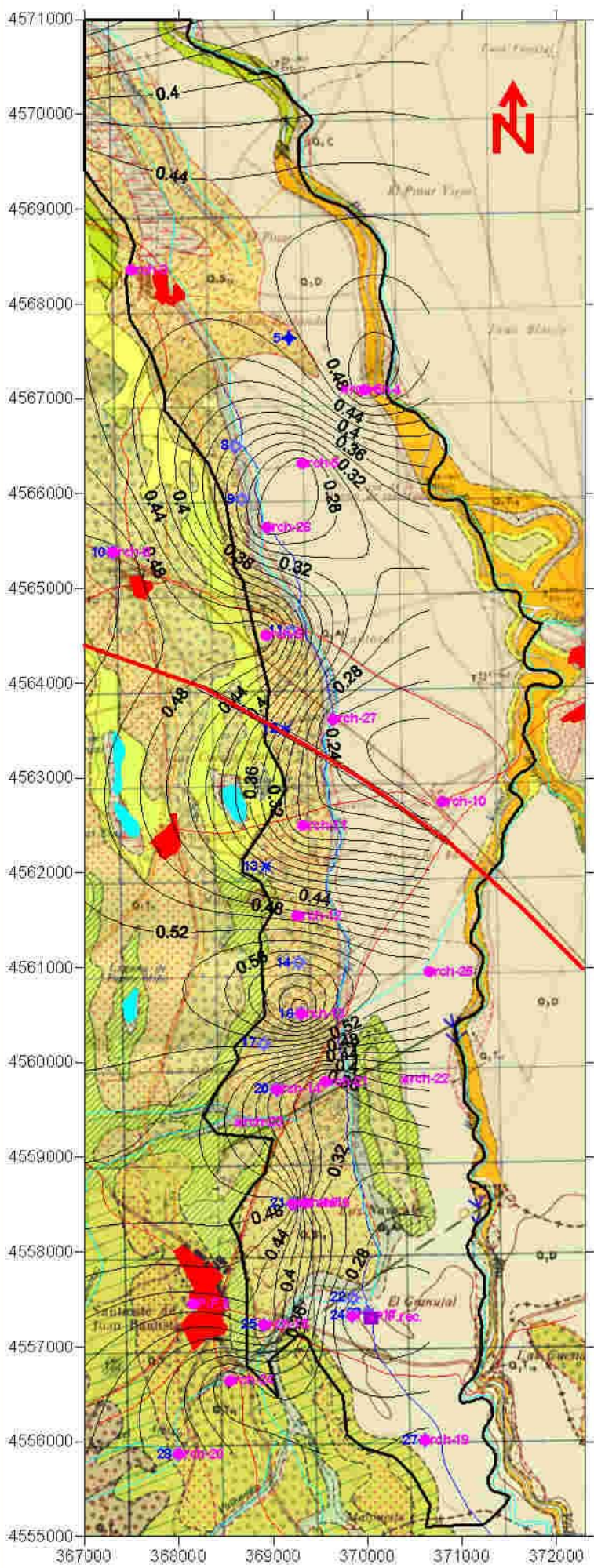
RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:	
INFERIOR A 50 m.	●
SUPERIOR A 50 m	✱



ESCALA 1:50.000

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l



LEYENDA MAPA BASE:

CUATERNARIO	PERIÓDICO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO
CUATERNARIO	PERIÓDICO	QUATERNARIO	Q2 A1	Q2 A1
			Q2 B1	Q2 B1
			Q2 C	Q2 C
		QUATERNARIO	Q1 S10	Q1 S10
			Q1 T4	Q1 T4
			Q1 T13	Q1 T13
	PERIÓDICO	QUATERNARIO	Q1 T10	Q1 T10
			Q1 T11	Q1 T11
			Q1 T12	Q1 T12
		QUATERNARIO	Q1 T13	Q1 T13
			Q1 T14	Q1 T14
			Q1 T15	Q1 T15
CUATERNARIO	PERIÓDICO	QUATERNARIO	Q1 T16	Q1 T16
			Q1 T17	Q1 T17
			Q1 T18	Q1 T18
		QUATERNARIO	Q1 T19	Q1 T19
			Q1 T20	Q1 T20
			Q1 T21	Q1 T21
	PERIÓDICO	QUATERNARIO	Q1 T22	Q1 T22
			Q1 T23	Q1 T23
			Q1 T24	Q1 T24
		QUATERNARIO	Q1 T25	Q1 T25
			Q1 T26	Q1 T26
			Q1 T27	Q1 T27

- Q2 A1: A lo largo de la zona y hacia el sur en forma de...
- Q2 B1: Frente de arena arenosa y arena...
- Q2 C: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 S10: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T4: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T13: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T10: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T11: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T12: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T13: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T14: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T15: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T16: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T17: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T18: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T19: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T20: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T21: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T22: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T23: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T24: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T25: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T26: Frente de arena arenosa y arena...
- Q1 T27: Frente de arena arenosa y arena...

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envoltorio acuífero cuaternario
- Cabecera del caz de recarga artificial

RCH-99 - PREOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m



ESCALA 1:50.000

**CUBETA DE SANTIUSTE
CARTOGRAFÍA DE ISORRELACIONES
IÓNICAS CLORURO-BICARBONATO**

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

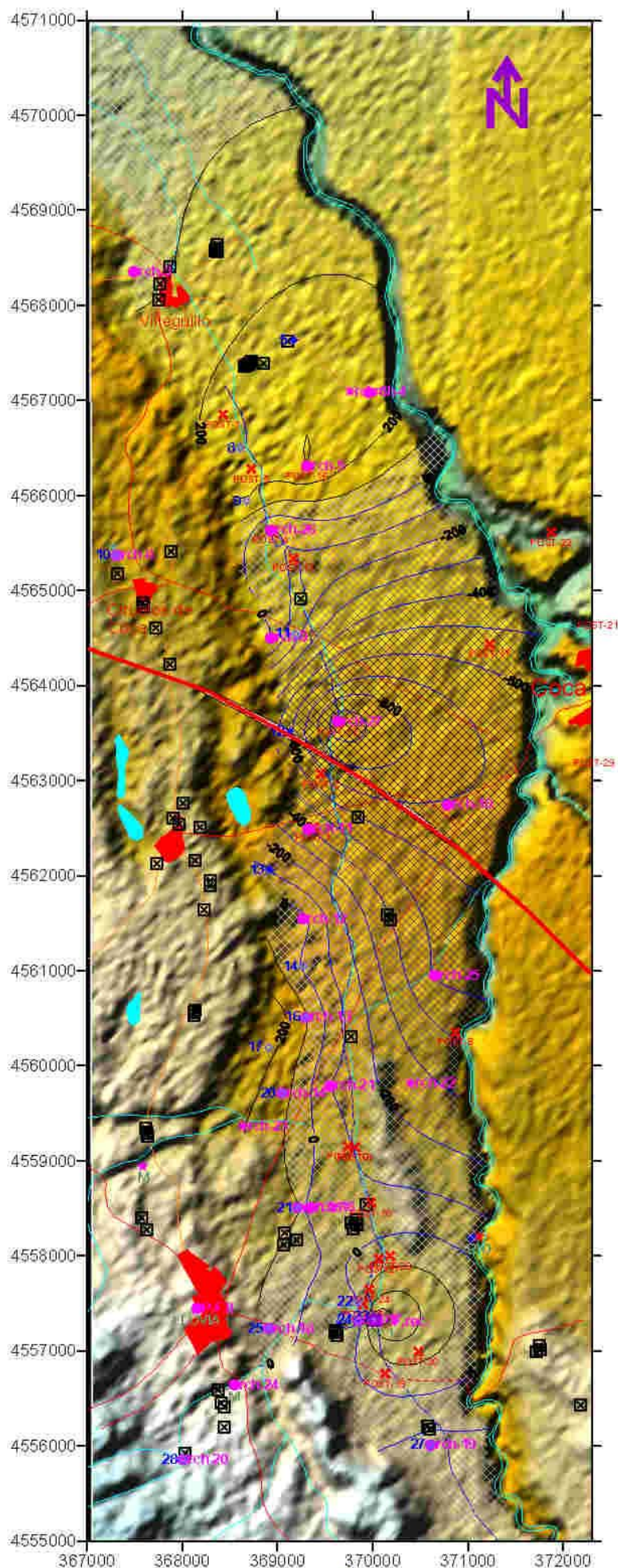
3-1 AGUAS

3.1.3.6. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA . MAPAS DE ISOVARIACIONES DE ISOCORAS E ISORRELACIONES IÓNICAS ENTRE 1999 Y 2003

- **Distribución de conductividad**
- **Distribución de la concentración de ion Cl^-**
- **Distribución de la concentración de ion NO_3^-**
- **Distribución de la concentración de iones alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)**
- **Distribución de la concentración de iones alcalinotérreos ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$)**
- **Distribución de la concentración de CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$**
- **Distribución de ion $\text{SO}_4^{=}$**

- **Relación iónica magnesio/calcio**
- **Relación iónica potasio/sodio**
- **Relación iónica cloruro/bicarbonato**
- **Relación iónica sulfato/cloruro**



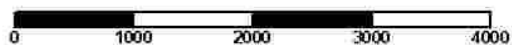


LEYENDA:

- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas
- RCH-99 - PREOPERACIONAL**
- CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:**
- ✱ INFERIOR A 75 m.
- ✱ ENTRE 75 Y 150 m
- ✱ SUPERIOR A 150 m
- RCC-03 - SINOPERACIONAL**
- CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:**
- INFERIOR A 50 m.
- ✱ SUPERIOR A 50 m
- RCC-03 - POSTOPERACIONAL**
- ✕ RCC POST. PROF. MENOR DE 150 M
- POLOS FRÍOS**
- ★ RIO VOLTOYA
- ★ AGUA DE LLUVIA 2502
- ★ AGUA DE AR (CABECERA)
- ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
- ★ POLO FRÍO: MANANTIALES
- ★ HUMEDALES

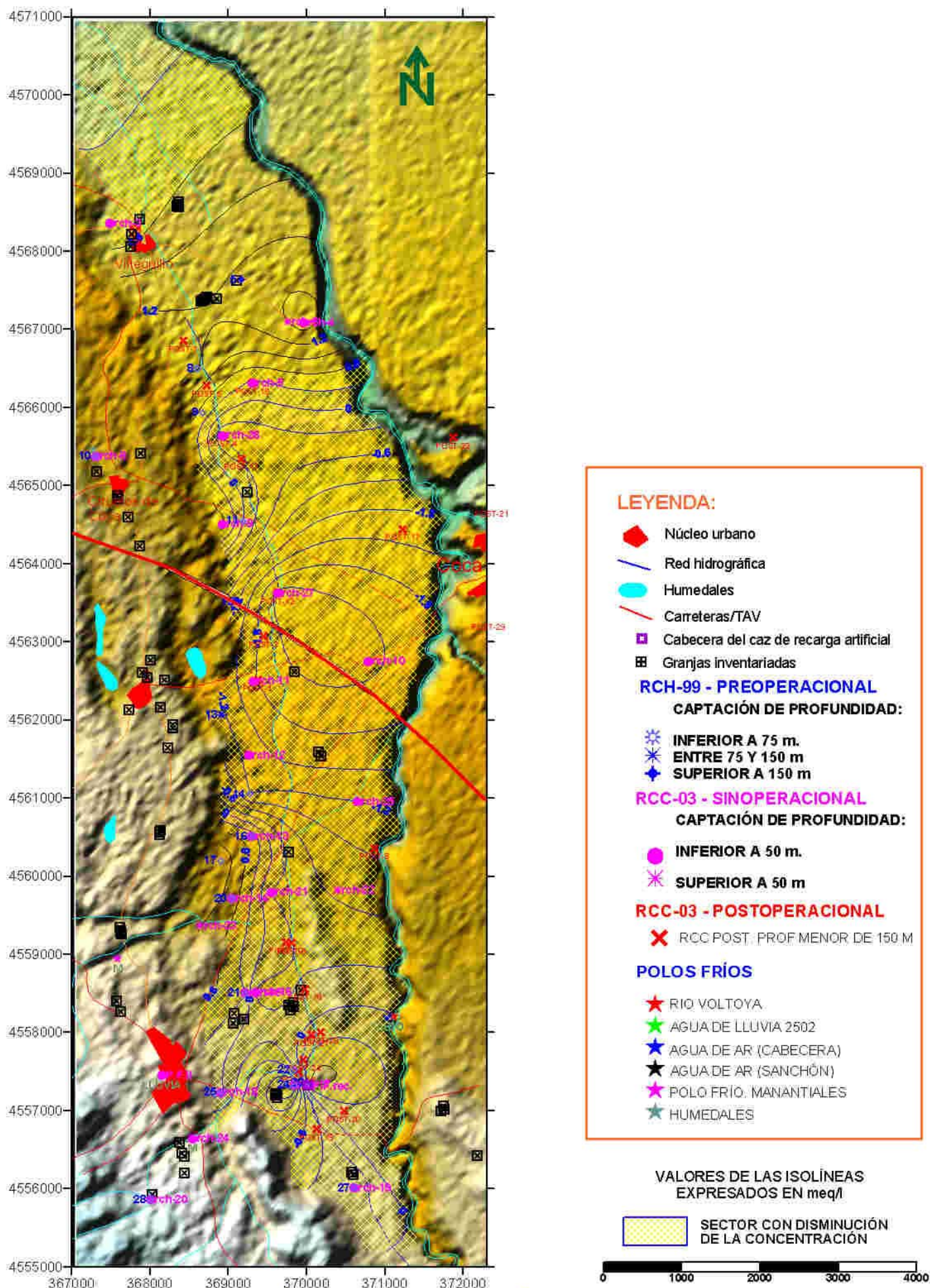
VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN MICROSIEMENS/CM

 SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA CONDUCTIVIDAD

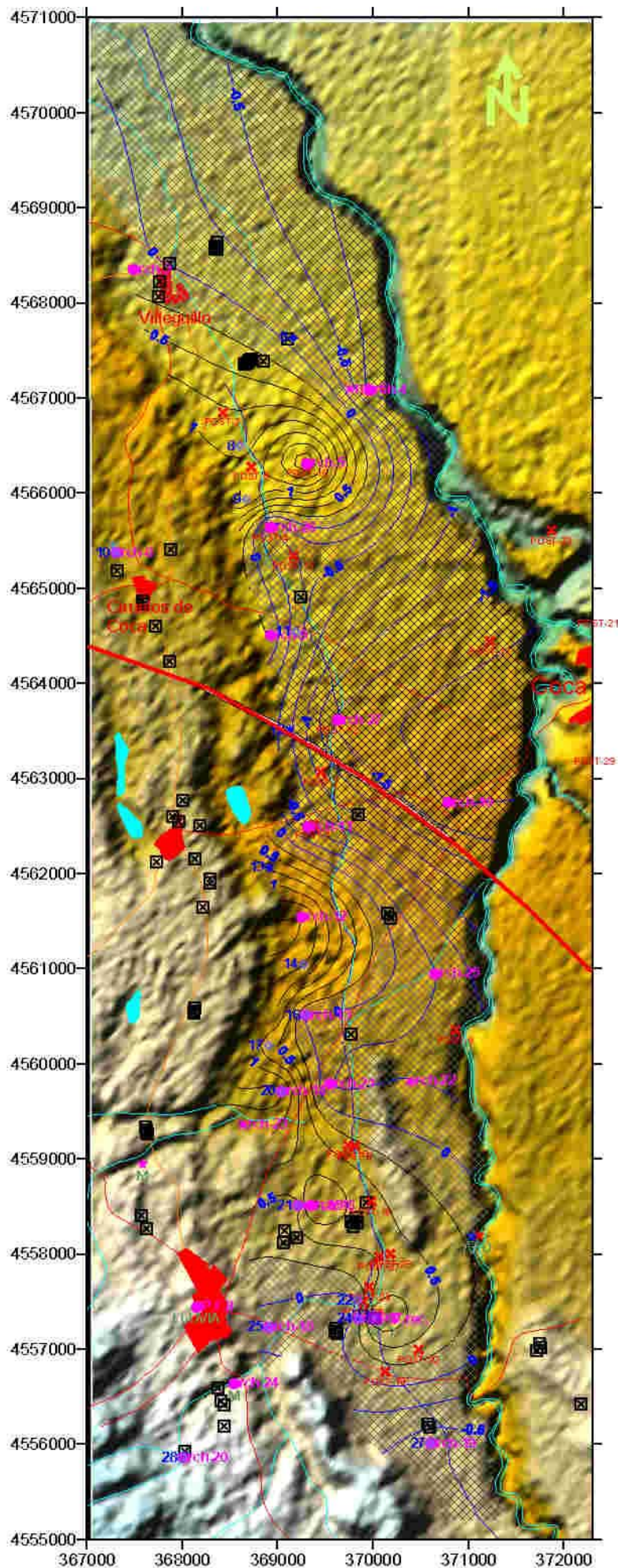


ESCALA 1:50,000

**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
DIFERENCIA DE ISOCONDUCTIVIDAD**



PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL) IÓN CLORUROS



LEYENDA:

- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas

RCH-99 - PREOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- ✱ INFERIOR A 75 m.
- ✱ ENTRE 75 Y 150 m
- ✱ SUPERIOR A 150 m

RCC-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- ✱ SUPERIOR A 50 m

RCC-03 - POSTOPERACIONAL

- ✕ RCC POST. PROF. MENOR DE 150 M

POLOS FRÍOS

- ★ RIO VOLTOYA
- ★ AGUA DE LLUBA 2502
- ★ AGUA DE AR (CABECERA)
- ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
- ★ POLO FRÍO, MANANTIALES
- ★ HUMEDALES

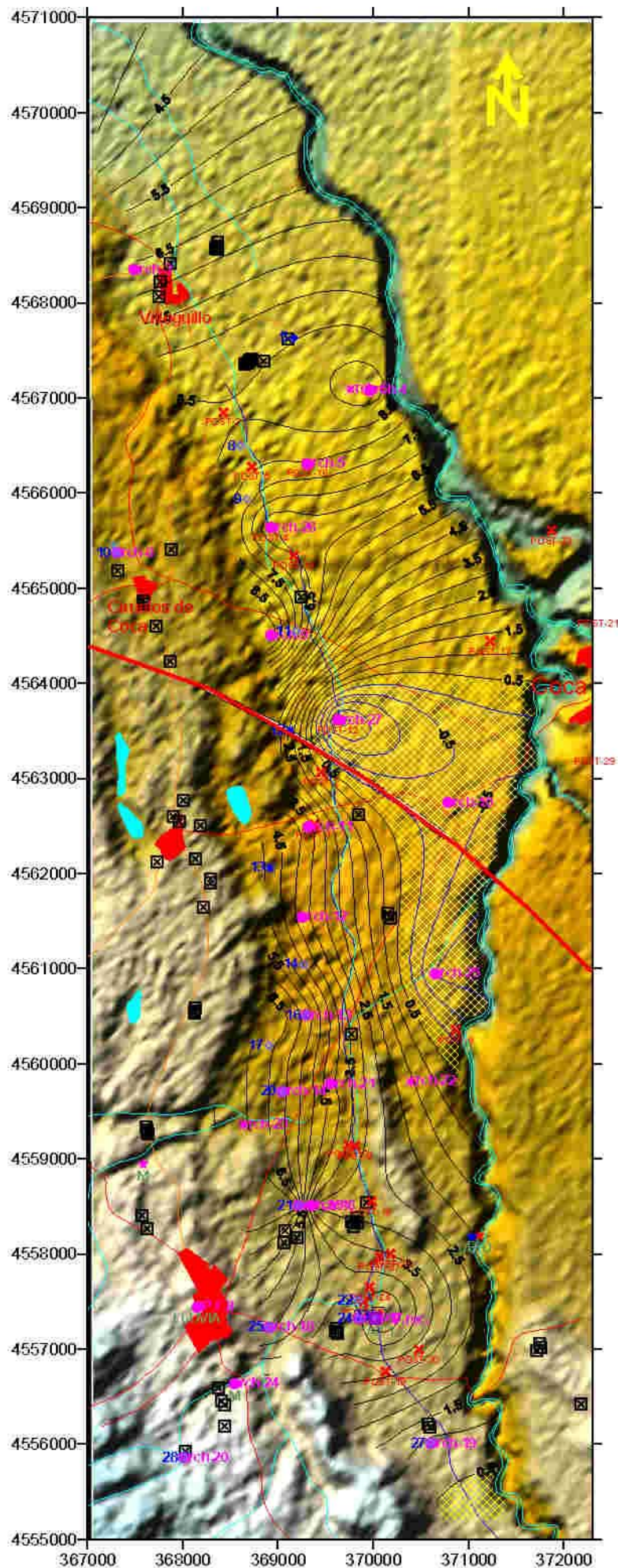
VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

 SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA ISOCONCENTRACIÓN



**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
IONES POTASIO + SODIO**

ESCALA 1:50.000



LEYENDA:

- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas
- RCH-99 - PREOPERACIONAL**
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:
 - ✱ INFERIOR A 75 m
 - ✱ ENTRE 75 Y 150 m
 - ✱ SUPERIOR A 150 m
- RCC-03 - SINOPERACIONAL**
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:
 - INFERIOR A 50 m.
 - ✱ SUPERIOR A 50 m
- RCC-03 - POSTOPERACIONAL**
 - ✕ RCC POST. PROF. MENOR DE 150 M
- POLOS FRÍOS**
 - ★ RIO VOLTOYA
 - ★ AGUA DE LLUVA 2502
 - ★ AGUA DE AR (CABECERA)
 - ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
 - ★ POLO FRÍO. MANANTIALES
 - ★ HUMEDALES

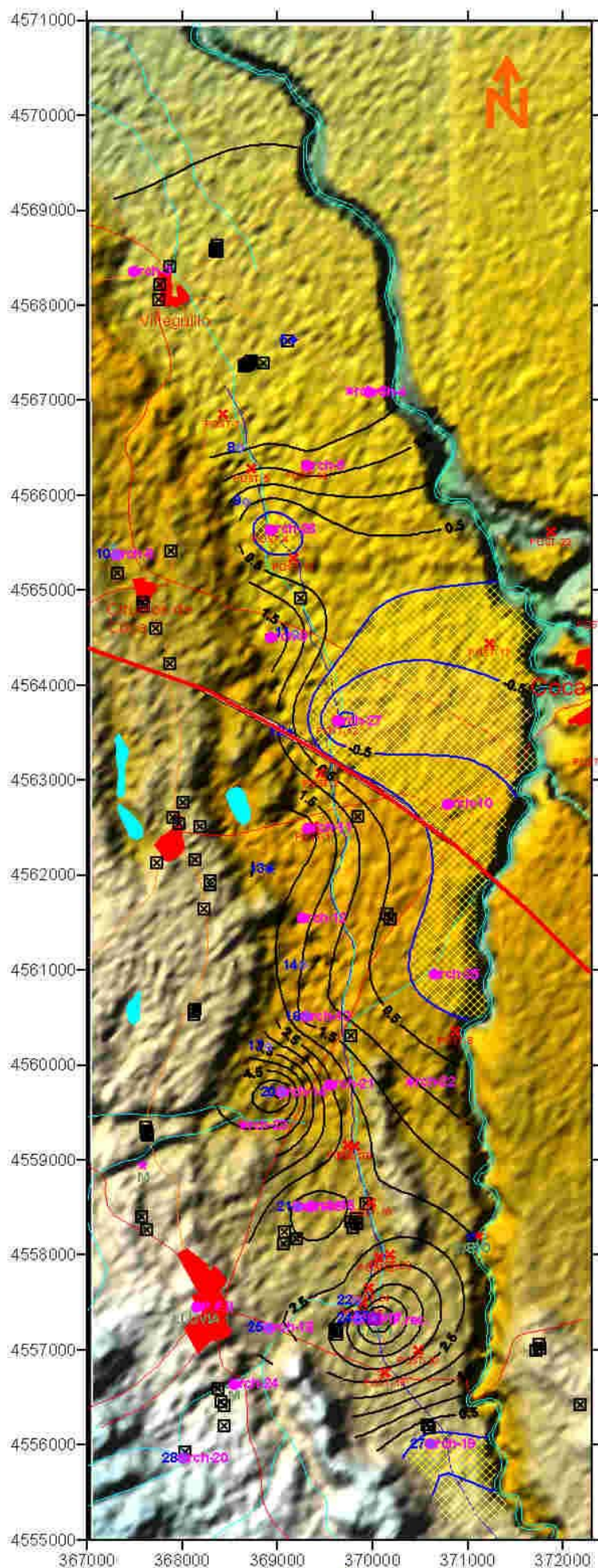
VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

 SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA CONCENTRACIÓN



**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
IONES CALCIO + MAGNESIO**

ESCALA 1:50.000



LEYENDA:

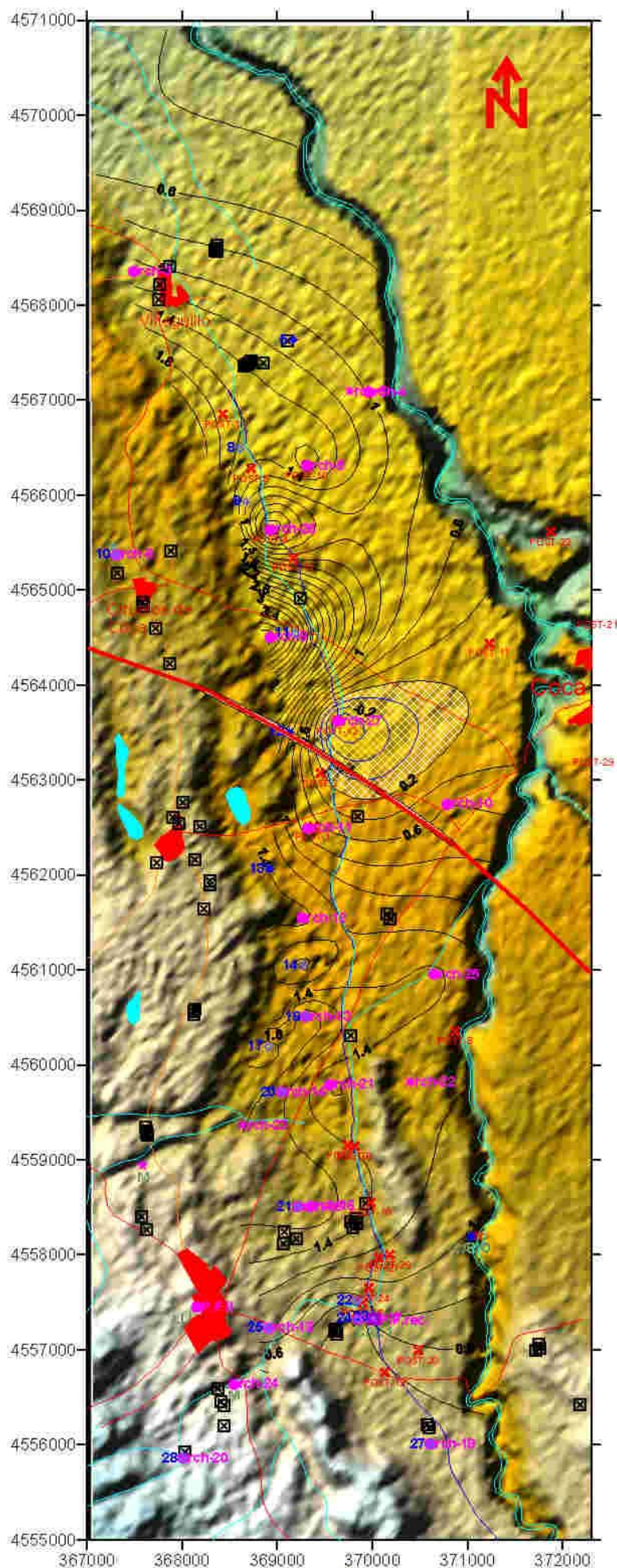
- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas
- RCH-99 - PREOPERACIONAL**
- CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:**
- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m
- RCC-03 - SINOPERACIONAL**
- CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:**
- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m
- RCC-03 - POSTOPERACIONAL**
- RCC POST. PROF. MENOR DE 150 M
- POLOS FRÍOS**
- RIO VOLTOYA
- AGUA DE LLUVIA 2502
- AGUA DE AR (CABECERA)
- AGUA DE AR (SANCHÓN)
- POLO FRÍO. MANANTIALES
- HUMEDALES

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA CONCENTRACIÓN

0 1000 2000 3000 4000
ESCALA 1:50.000

PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL) IÓN BICARBONATOS



LEYENDA:

- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- ▣ Granjas inventariadas

RCH-99 - PREOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- ✱ INFERIOR A 75 m.
- ✱ ENTRE 75 Y 150 m
- ✱ SUPERIOR A 150 m

RCC-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- ✱ SUPERIOR A 50 m

RCC-03 - POSTOPERACIONAL

- ✱ RCC. PROF. MENOR DE 150 M

POLOS FRÍOS

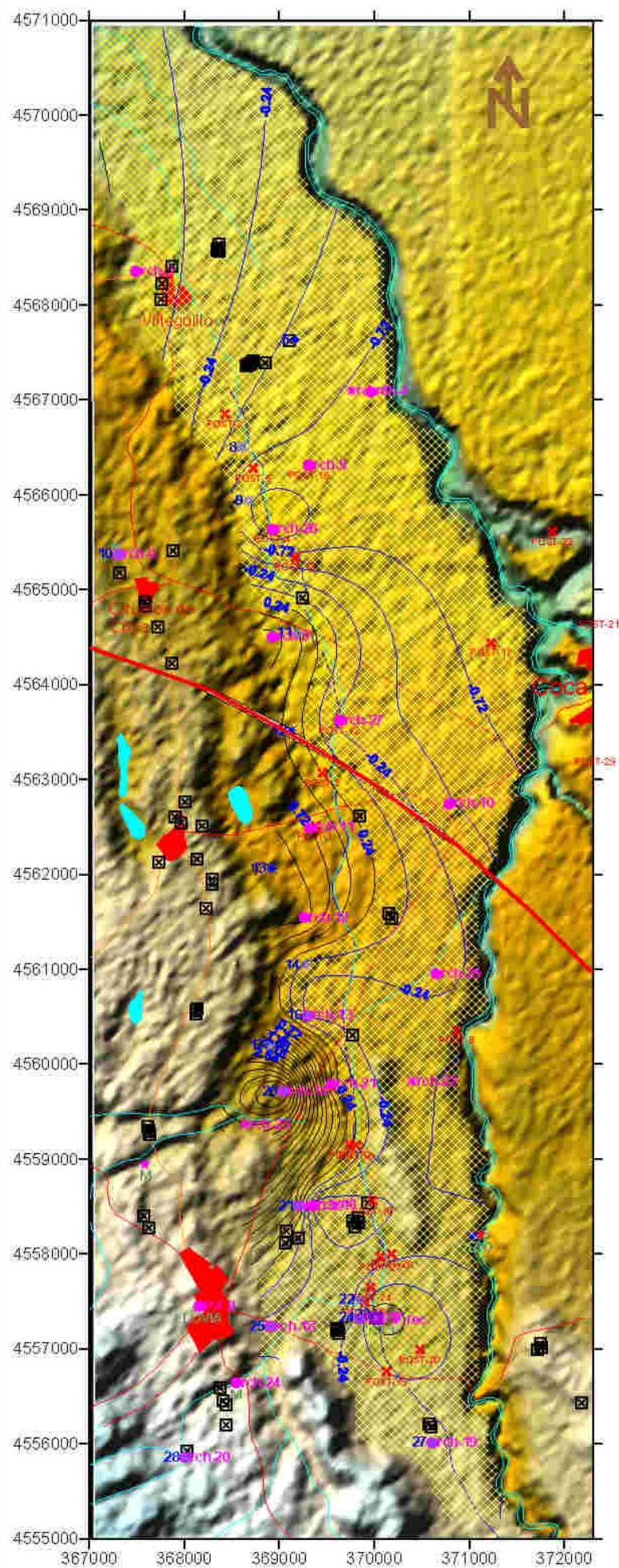
- ★ RIO VOLTOYA
- ★ AGUA DE LLUVIA 2502
- ★ AGUA DE AR (CABECERA)
- ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
- ★ POLO FRÍO: MANANTIALES
- ★ HUMEDALES

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA CONCENTRACIÓN

0 1000 2000 3000 4000
ESCALA 1:50.000

**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
IÓN SULFATOS**

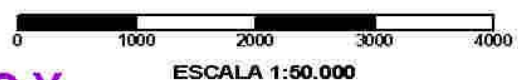


LEYENDA:

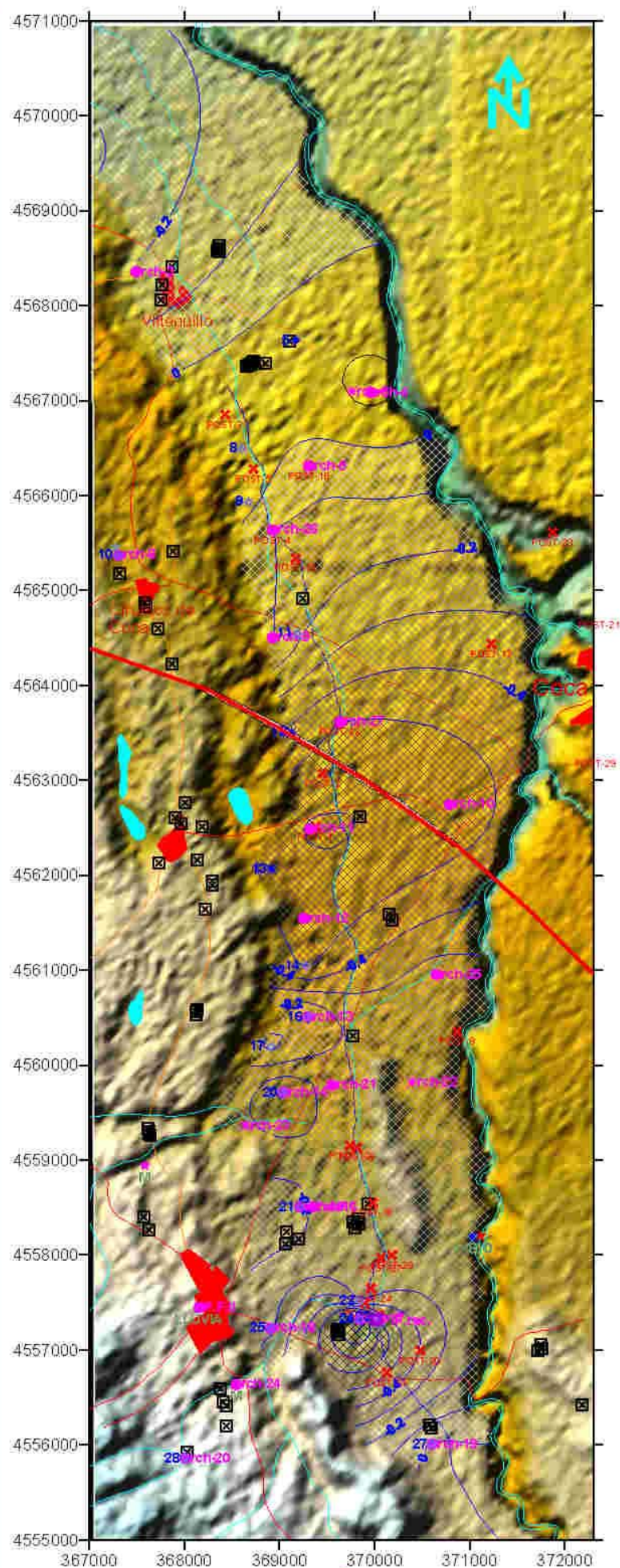
- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas
- RCH-99 - PREOPERACIONAL**
- CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:**
- ⊗ INFERIOR A 75 m.
- ⊗ ENTRE 75 Y 150 m
- ◆ SUPERIOR A 150 m
- RCC-03 - SINOPERACIONAL**
- CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:**
- INFERIOR A 50 m.
- ✱ SUPERIOR A 50 m
- RCC-03 - POSTOPERACIONAL**
- ✕ RCC POST. PROF MENOR DE 150 M
- POLOS FRÍOS**
- ★ RIO VOLTOYA
- ★ AGUA DE LLUVIA 2502
- ★ AGUA DE AR (CABECERA)
- ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
- ★ POLO FRÍO, MANANTIALES
- ★ HUMEDALES

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

 SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA ISORRELACIÓN



**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
RELACIÓN IÓNICA MAGNESIO/CALCIO**



LEYENDA:

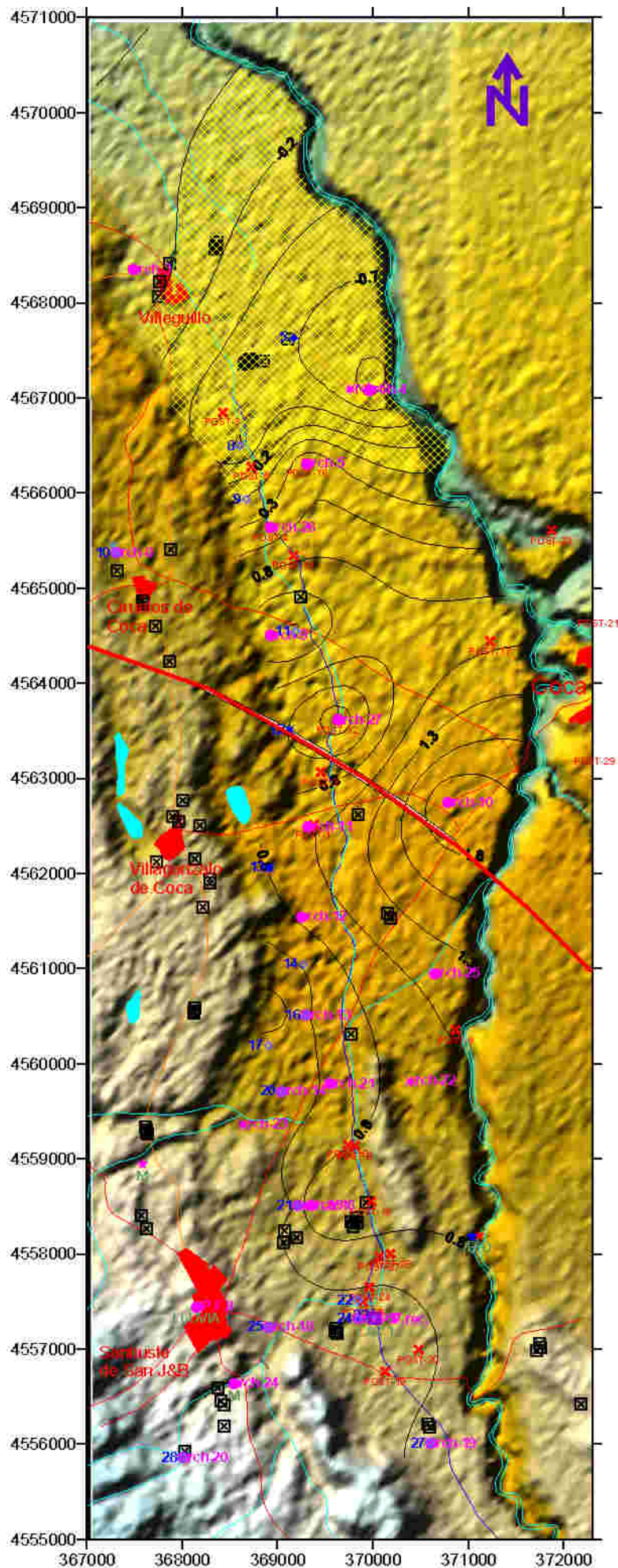
- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas
- RCH-99 - PREOPERACIONAL**
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:
 - ✱ INFERIOR A 75 m.
 - ✱ ENTRE 75 Y 150 m
 - ✱ SUPERIOR A 150 m
- RCC-03 - SINOPERACIONAL**
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:
 - INFERIOR A 50 m.
 - ✱ SUPERIOR A 50 m
- RCC-03 - POSTOPERACIONAL**
 - ✱ RCC POST. PROF. MENOR DE 150 M
- POLOS FRÍOS**
 - ★ RÍO VOLTOYA
 - ★ AGUA DE LLUVIA 2502
 - ★ AGUA DE AR (CABECERA)
 - ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
 - ★ POLO FRÍO. MANANTIALES
 - ★ HUMEDALES

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

 SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA ISORELACIÓN

0 1000 2000 3000 4000
ESCALA 1:50.000

**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
RELACIÓN IÓNICA CLORUROS/BICARBONATOS**



LEYENDA:

- ◆ Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Cabecera del caz de recarga artificial
- Granjas inventariadas
- RCH-99 - PREOPERACIONAL**
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:
 - ✱ INFERIOR A 75 m.
 - ✱ ENTRE 75 Y 150 m
 - ✱ SUPERIOR A 150 m
- RCC-03 - SINOPERACIONAL**
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:
 - INFERIOR A 50 m.
 - ✱ SUPERIOR A 50 m
- RCC-03 - POSTOPERACIONAL**
 - ✕ RCC POST. PROF. MENOR DE 150 M
- POLOS FRÍOS**
 - ★ RIO VOL TOYA
 - ★ AGUA DE LLUVIA 2502
 - ★ AGUA DE AR (CABECERA)
 - ★ AGUA DE AR (SANCHÓN)
 - ★ POLO FRÍO. MANANTIALES
 - ★ HUMEDALES

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

 SECTOR CON DISMINUCIÓN
DE LA ISORELACIÓN

0 1000 2000 3000 4000
ESCALA 1:50.000

**PUNTOS DE INTERÉS HIDROGEOQUÍMICO Y
CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA DE LA DIFERENCIA
ENTRE 1999 (PREOPERACIONAL) Y 2003 (SINOPERACIONAL)
RELACIÓN IÓNICA SULFATOS/CLORUROS**

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

3.1.4. PUNTOS ADECUADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AMBIENTES. FASE POSTOPERACIONAL

3.1.4.1. RESULTADOS ANALÍTICOS

3.1.4.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INESTABLES



OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

**RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA
FASE POSTOPERACIONAL VERANO DE 2003**

PUNTOS DE AGUA Y PARÁMETROS INESTABLES

PTO	PUNTO	X	Y	Z	NAT	Prof. (m)	N.E. (m)	Prof m (m)	cota m	fecha	C(μS/cm)	pH c	Tª ag	Tª air	O2 ppm	TSD ppm	sal %	NO3 ppm	FeT ppb	OBSERVACIONES
P-1	GPS-47	368948	4567013	773,8	S	?	n/a	20	753,8	23-jul-03	693	7,49	18	35	6,3	346	1,4	4,7	67	Muestra bombeo
P-2	GPS-46	368629	4566865	773,3	S	?	n/a	0	773,3	23-jul-03	679	7,7	18	36	4,71	341	1,4	7,4	23	
P-3	INV 59	368421	4566857	773,1	P	12	5,06	9	764,1	jul-03	1323	8,07	21	36	6,73	658	2,7	13,1	812	
P-4	SW-3	369306	4566315	778,7	Pi	20,5	10,62	13	765,7	23-jul-03	1445	7,32	16,4	34	5,98	722	2,8	60	-	
P-5	INV 61	368722	4566285	775,2	P	7,5	5,82	6,5	768,7	jul-03	556	9,49	23	37	8,09	284	1,2	6,1	245	
P-6	RCR-99-02	368926	4565642	775	Pi	20	1,84	4,5	770,5	jul-03	820	7,72	17	38	5,19	408	1,7	16,6	640	
P-7	GPS-25	371870	4565615	754,8	S	5,7	3,7	5	749,8	jul-03	782	7,75	18	34	5,51	390	1,6	5,6	185	
P-8	RCP-14	369166	4565346	773,9	P	7,6	2,42	6,5	767,4	23-jul-03	891	7,8	17	38,5	5,17	447	1,8	7,4	139	
P-9	GPS-24	372320	4565121	766,2	P	115?	50	67	699,2	jul-03	269,9	9,17	19	34	5,55	135,3	0,6	N/A	500	
P-10	5 caños	372364	4564746	757,6	M	0	0	0	757,6	jul-03	282,6	6,91	20	34,2	4,3	140,8	0,6	3,7	216	
P-11	SW-14	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7	22-jul-03	455	8,03	16	31,7	1,3	228	0,9	66	889	
P-12	RCR-99-03	369626	4563622	779,6	Pi	23	2,28	6	773,6	23-jul-03	472	7,68	18	35	3,01	235	1	5,8	980	
P-13	GPS-19	372322	4563291	774,9	P	4,2	2,51	3	771,9	jul-03	528	7,29	18	33	6?	263	1,05	28,2	650	
P-14	INV-87c	369546	4563107	783,7	P	?	n/a	9	774,7	23-jul-03	460	7,89	19,1	35	3,07	221	1	6,7	1007	
P-15	INV 88	369454	4563073	784,1	S	22	n/a	30	754,1	jul-03	793	7,92	18	35	5,430	398	1,6	20,5	145	Muestra bombeo
P-16	RCP-22	369373	4562516	784,5	S	27,8	8,63	20	764,5	jul-03	963	7,56	18	34	5,31	479	1,9	13,5	161	
P-17	GPS-16	370868	4560359	773,6	M	0	0	0	773,6	23-jul-03	818	8,53	17	29	6,24	409	1,6	7,7	640	Fuente fria
P-18	RCP-27	370392	4559822	792,6	S	>100	42	45	747,6	23-jul-03	451	9,12	16	20	7,37	226	0,9	2,2	212	
P-19	RCP-27	370392	4559822	792,6	S	>100	42	90	702,6	23-jul-03	387	9,17	16,5	23	5,66	195	0,8	0,2	507	
P-20	14-b mi	369732	4559154	797,9	S	8	4	7	790,9	23-jul-03	872	7,91	18	32	6,36	444	1,9	15	1234	
P-21	14-c md	369807	4559143	797,2	P	4,2	3,64	4	793,2	23-jul-03	760	7,59	17	32	6,18	379	1,7	21,7	1021	
P-22	SW-13	369979	4558559	798,3	Pi	21	14,65	18	780,3	22-jul-03	628	7,38	16,3	31,2	5,25	315	1,3	53	153,5	
P-23	RCR-9	370182	4558002	800,3	P	3,9	2,76	3,1	797,2	jul-03	179	9,52	16	24	7,5	40	0,4	66	1640	
P-24	RCR-10a	370063	4557972	800,9	P	3,9	3,3	3,6	797,3	jul-03	428	8,08	15	25	5,8	214	0,8	16,2	850	
P-25	RCR-7	369961	4557653	802,7	Pi	7,3	6,57	7	795,7	jul-03	448	7,66	15	33,6	3,8	224	0,8	53	500	
P-26	RCR-4	369889	4557497	801,8	P	14,8	6,8	8,8	793	jul-03	655	7,58	11	32	6,1	334	1,35	143	746	
P-27	RCR-4	369889	4557497	801,8	P	14,8	6,8	13	788,8	jul-03	607	7,55	11	31	6,1	304	1,1	150	680	
P-28	SW-10	370474	4556999	803,8	Pi	39	19,51	24	779,8	22-jul-03	310	8,08	-	16,8	6,05	148	0,6	42	643	
P-29	RCR-99-06	370124	4556765	800,2	Pi	38	10,57	20	780,2	22-jul-03	749	7,33	17,5	27	7,4	374	1,5	9,8	646	

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

**RED DE CONTROL DE LA HIDROQUÍMICA
FASE POSTOPERACIONAL VERANO DE 2003**

PUNTOS SELECCIONADOS PARA LA ELABORACIÓN DE PERFILES HIDROQUÍMICOS

PERFIL	PTO	PUNTO	X	Y	Z	NAT	Prof. Act (m)	N.E. (m)	Prof muestra	cota muestra
P-1	P-2	GPS-46	368629	4566865	773,3	S	n/a	n/a	0	773,3
P-1	P-1	GPS-47	368948	4567013	773,8	S	n/a	n/a	20	753,8
P-1	P-3	INV 59	368421	4566857	773,1	P	12	5,06	9	764,1
P-2	P-4	SW-3	369306	4566315	778,7	Pi	20,5	10,62	13	765,7
P-2	P-5	INV 61	368722	4566285	775,2	P	7,5	5,82	6,5	768,7
P-3	P-6	RCR-99-02	368926	4565642	775	Pi	20	1,84	4,5	770,5
P-3	P-8	RCP-14	369166	4565346	773,9	P	7,6	2,42	6,5	767,4
P-4	P-11	SW-14	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-4	P-7	GPS-25	371870	4565615	754,8	S	5,7	3,7	5	749,8
P-5	P-11	SW-14	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-5	P-9	GPS-24	372320	4565121	766,2	P	125	50	67	699,2
P-6	P-11	SW-14	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-6	P-10	5 caños	372364	4564746	757,6	M	0	0	0	757,6
P-7	P-11	SW-14	371224	4564445	782,2	Pi	12	8,87	10,5	771,7
P-7	P-13	GPS-19	372322	4563291	774,9	P	4,2	2,51	3	771,9
P-8	P-12	RCR-99-03	369626	4563622	779,6	Pi	23	2,28	6	773,6
P-8	P 03-2	P 03-2	369694	4563335	785,3	S	n/a	n/a	n/a	jul-03
P-9	P-14	INV-87c	369546	4563107	783,7	P	n/a	n/a	9	774,7
P-9	P-15	INV 88	369454	4563073	784,1	S	22	n/a	30	754,1
P-10	P-14	INV-87c	369546	4563107	783,7	P	n/a	n/a	9	774,7
P-10	P-16	RCP-22	369373	4562516	784,5	S	27,8	8,63	20	764,5
P-11	P-18	RCP-27	370392	4559822	792,6	S	>100	42	45	747,6
P-11	P-19	RCP-27	370392	4559822	792,6	S	>100	42	90	702,6
P-11	P-17	GPS-16	370868	4560359	773,6	M	0	0	0	773,6
P-12	P-21	14-c md	369807	4559143	797,2	P	4,2	3,64	4	793,2
P-12	P-20	14-b mi	369732	4559154	797,9	S	8	4	7	790,9
P-13	P-20	14-b mi	369732	4559154	797,9	S	8	4	7	790,9
P-13	P-22	SW-13	369979	4558559	798,3	Pi	21	14,65	18	780,3
P-14	P-24	RCR-10a	370063	4557972	800,9	P	3,9	3,3	3,6	797,3
P-14	P-23	RCR-9	370182	4558002	800,3	P	3,9	2,76	3,1	797,2
P-15	P-25	RCR-7	369961	4557653	802,7	Pi	7,3	6,57	7	795,7
P-15	P-26	RCR-4	369889	4557497	801,8	P	14,8	6,8	8,8	793
P-15	P-27	RCR-4	369889	4557497	801,8	P	14,8	6,8	13	788,8
P-16	P-29	RCR-99-06	370124	4556765	800,2	Pi	38	10,57	20	780,2
P-16	P-28	SW-10	370474	4556999	803,8	Pi	39	19,51	24	779,8

MICA
DE 2003

ELABORACIÓN DE PERFILES HIDROQUÍMICOS

Y	Z	NAT	Prof. Act (m)	N.E. (m)	Prof muestra	cota muestra
6865	773.3	S	n/a	n/a	0	773.3
7013	773.8	S	n/a	n/a	20	753.8
6857	773.1	P	12	5.06	9	764.1
6315	778.7	Pi	20.5	10.62	13	765.7
6285	775.2	P	7.5	5.82	6.5	768.7
5642	775	Pi	20	1.84	4.5	770.5
5346	773.9	P	7.6	2.42	6.5	767.4
4445	782.2	Pi	12	8.87	10.5	771.7
5615	754.8	S	5.7	3.7	5	749.8
4445	782.2	Pi	12	8.87	10.5	771.7
5121	766.2	P	125	50	67	699.2
4445	782.2	Pi	12	8.87	10.5	771.7
4746	757.6	M	0	0	0	757.6
4445	782.2	Pi	12	8.87	10.5	771.7
3291	774.9	P	4.2	2.51	3	771.9
3622	779.6	Pi	23	2.28	6	773.6
3335	785.3	S	n/a	n/a	n/a	jul-03
3107	783.7	P	n/a	n/a	9	774.7
3073	784.1	S	22	n/a	30	754.1
3107	783.7	P	n/a	n/a	9	774.7
2516	784.5	S	27.8	8.63	20	764.5
59822	792.6	S	>100	42	45	747.6
59822	792.6	S	>100	42	90	702.6
30359	773.6	M	0	0	0	773.6
59143	797.2	P	4.2	3.64	4	793.2
59154	797.9	S	8	4	7	790.9
59154	797.9	S	8	4	7	790.9
58559	798.3	Pi	21	14.65	18	780.3
57972	800.9	P	3.9	3.3	3.6	797.3
58002	800.3	P	3.9	2.76	3.1	797.2
57653	802.7	Pi	7.3	6.57	7	795.7
57497	801.8	P	14.8	6.8	8.8	793
57497	801.8	P	14.8	6.8	13	788.8
56765	800.2	Pi	38	10.57	20	780.2
56999	803.8	Pi	39	19.51	24	779.8

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

3.1.4.3. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA. MAPAS DE ISOCONTENIDOS PARA EL ACUÍFERO SUPERFICIAL. FASE POSTOPERACIONAL

- Conductividad
- Hierro total
- Nitratos

3.1.4.4. CARTOGRAFÍA TEMÁTICA. MAPAS DE ISORELACIONES IÓNICAS

- Nitratos/oxígeno disuelto
- Hierro total/oxígeno disuelto



ANEXO 4.4.1. LISTADOS DE IDENTIFICACIÓN Y CHEQUEO DE IMPACTOS

• Fase preoperacional

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
Presencia de humedales hidrodependientes de las aguas subterráneas (acuíferos)	S/N
Alteraciones en las pautas hidrodinámicas de la red de drenaje superficial y láminas de agua hipogénicas (ZI y ZA)	
Regadío con aguas subterráneas (ZI y ZA).	
Incremento en los costes de extracción de aguas por descenso del nivel freático	
Empleo de fertilizantes (ZA).	
Empleo de pesticidas (ZA).	
Empleo de purines (ZA).	
Empleo de otros compuestos orgánicos (ZA).	
Presencia de vectores orgánicos (ZI).	
Presencia de contaminación difusa (ZI y ZA).	
Incremento de la erosión del suelo (ZA).	
Erosiones de las orillas de los humedales (ZI y ZA).	
Introducción de especies animales exóticas (ZI).	
Introducción de especies vegetales exóticas (ZI).	
Presencia de cultivos alrededor (ZA).	
Prácticas agrícolas en las zonas de recarga (ZI).	
Laboreo (ZA).	
Drenajes (ZA).	
Vertido de residuos líquidos urbanos (ZA).	
Vertido de residuos sólidos urbanos (ZA).	
Vertido de residuos ganaderos (ZI y ZA).	
Existencia de EDAR (ZI). (+).	
Alteración de la vegetación hidrófila (ZA).	
Manifestaciones de estrés hídrico en las especies vegetales (ZA).	
Introducción de nuevas especies (cultivos o fauna) (ZI).	
Carga ganadera (ZI y ZA).	
Uso como abrevadero (ZA).	
Pastoreo (ZA).	
Excavaciones (ZA).	
Movimientos de tierras (ZA).	
Presión recreativa (ZA).	
Rellenado (ZA).	
Extracciones de agua (ZA).	
Vertido indirecto de agroquímicos (ZI y ZA).	
Vertido indirecto de pesticidas (ZI y ZA).	
Extracciones de áridos para construcción (ZA).	
Regulación hídrica (ZI y ZA). (-/+).	
Regulación de actividades (ZI y ZA). (+).	
Caza (ZA).	
Pesca (ZA).	
Fines recreativos (ZA).	
Fines medicinales (ZA).	
Monocultivos (pinares para explotación maderera y/o resinera, etc.) (ZI y ZA).	
Tensiones sociales al entrar intereses en competencia (ZI y ZA, especialmente Sobreexplotación de las especies piscícolas (ZA).	

Intrusiones técnicas (ZA). (-/+).
Drenaje de humedales (ZI y ZA).
Drenaje de cursos de agua superficiales (ZI y ZA).
Drenaje en la zona de recarga (ZI y ZA).
Presencia de construcciones (ZI y ZA, especialmente ZA).
Edificaciones (ZI y ZA, especialmente ZA).
Carreteras (ZI y ZA, especialmente ZA).
Vías ferroviarias (ZA).
Acequias (ZI y ZA).
Canalizaciones (ZI y ZA).
Canales (ZI y ZA).
Otras conducciones (ZI y ZA).
Extracciones de áridos en la zona de recarga (ZI y ZA).
Actividad minera o canteras (ZI y ZA).
Sobreexplotación de recursos (ZI y ZA).
Presencia de procesos contaminantes (ZI y ZA).
Contaminación química (ZA).
Contaminación térmica (ZA).
Contaminación por metales pesados (ZI y ZA).
Contaminación por lluvia ácida (ZI y ZA).
Densidad de habitantes en la cuenca de recepción (ZA), (-/+).
Desecación o reducción de caudales en manantiales (ZI y ZA).
Reducción de la productividad en captaciones (ZA).
Cambios en las relaciones aguas subterráneas / aguas superficiales (ZI y ZA), (-).
Nuevas canalizaciones (ZA). (+).
Nuevos cauces (ZI y ZA).
Incremento de la evapotranspiración (como componente del ciclo hidrológico de una zona determinada) (ZA).
Posibilidad de conectar estratos en acuíferos multicapa al desaturar un contacto
Presencia de captaciones profundas con descuelgue de aguas superficiales (ZI y
Indicios de reciclaje por retornos de riegos (ZA), (-/+).
Indicios de recirculación (ZA).
Eficiencia en el regadío (ZI y ZA), (+).
Incremento de la colmatación en humedales y depresiones endorreicas (ZI y ZA).
Presencia de sinergismos (ZI y ZA).
Impactos indirectos (ZI y ZA).
Impactos diferidos (ZI y ZA).

Tabla 1. Listado de chequeo de impactos para una zona sometida a operaciones de recarga artificial con objetivos medioambientales. Fase preoperacional. División zonal asociada a cada impacto: ZA corresponde a la zona de actuación y ZI a la de intervención. Los signos del impacto son negativos, salvo especificación.

• Fase sinoperacional

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
Existencia de perímetro de protección. (ZA), (-/+).	
Urbanización dentro del perímetro de protección, (ZA).	
Incremento del volumen de agua almacenado en el acuífero (ZA), (+).	
Modificaciones en la calidad de las aguas del acuífero (ZA), (+/-).	
Incidencia en el medio de las estructuras de recarga (ZA), (-).	
Inundaciones puntuales por razones topográficas (ZA), (-).	
Frecuencia de inundaciones por razones meteorológicas (ZI/ZA), (-).	
Colmatación de las paredes y fondo del caz de recarga (ZA), (-).	
Compactación de los limos del lecho (ZA), (-).	
Altura de la lámina de agua (ZA), (-).	
Descenso de la permeabilidad del lecho por decantación de partículas finas (ZA).	
Erosión de los taludes (ZA), (-).	
Desprendimientos/deslizamientos en taludes (ZA), (-).	
Tránsito de tractores y maquinaria agrícola (ZA), (+/-).	
Variación del régimen hídrico de la red fluvial global (ZI y ZA), (-).	
Evolución de la calidad de las aguas (ZA), (+).	
Evolución de la contaminación difusa (ZA), (+).	
De los metales pesados (ZI y ZA), (+/-).	
De la salinidad (ZA), (+).	
De la alcalinidad (ZA), (+/-).	
De los vectores contaminantes orgánicos (ZA), (+).	
Estratificación hidroquímica en la en ZNS (ZA), (-).	
Movilización de fuertes concentraciones de iones salinos de lagunas fosilizadas, lenteiones, etc. (ZI y ZA), (-).	
Efecto de descuelgue a través de sondeos profundos (ZA), (-).	
Reciclaje de las aguas (ZA), (-).	
Concurrencia de fuertes precipitaciones durante las labores de recarga artificial	
Impacto ambiental generado como consecuencia de la colmatación del caz (ZA).	
Afecciones indirectas a elementos ambientales (ZI y ZA), (-).	
Impactos socioeconómicos por ascenso del nivel del agua (ZA), (-/+).	
Bodegas (ZA), (-).	
Cementerios (ZA), (-).	
Pasos bajo vías de comunicación (ZA), (-).	
Vías de comunicación (ZA), (+/-).	
Impactos derivados de cambios de usos del suelo (ZA), (+/-).	
Forestaciones (ZA), (-).	
Repoblaciones (ZA), (-).	
Tipo de vegetación (ZA), (-).	
Arbórea.	
Arbustiva.	
Herbácea.	
Perenne (-).	
Caducifolia.	
Generación de condiciones oxidantes por embalsamiento (ZA), (-).	
Generación de eutrofización por embalsamiento (ZA), (-).	
Generación de unas condiciones hídricas perturbadas (ZI y ZA), (-).	
Contratiempos técnicos y jurídicos (ZA), (-).	
Impacto en la vegetación nativa (ZA), (-).	
Afección del ascenso del nivel freático en las raíces (ZA), (-).	

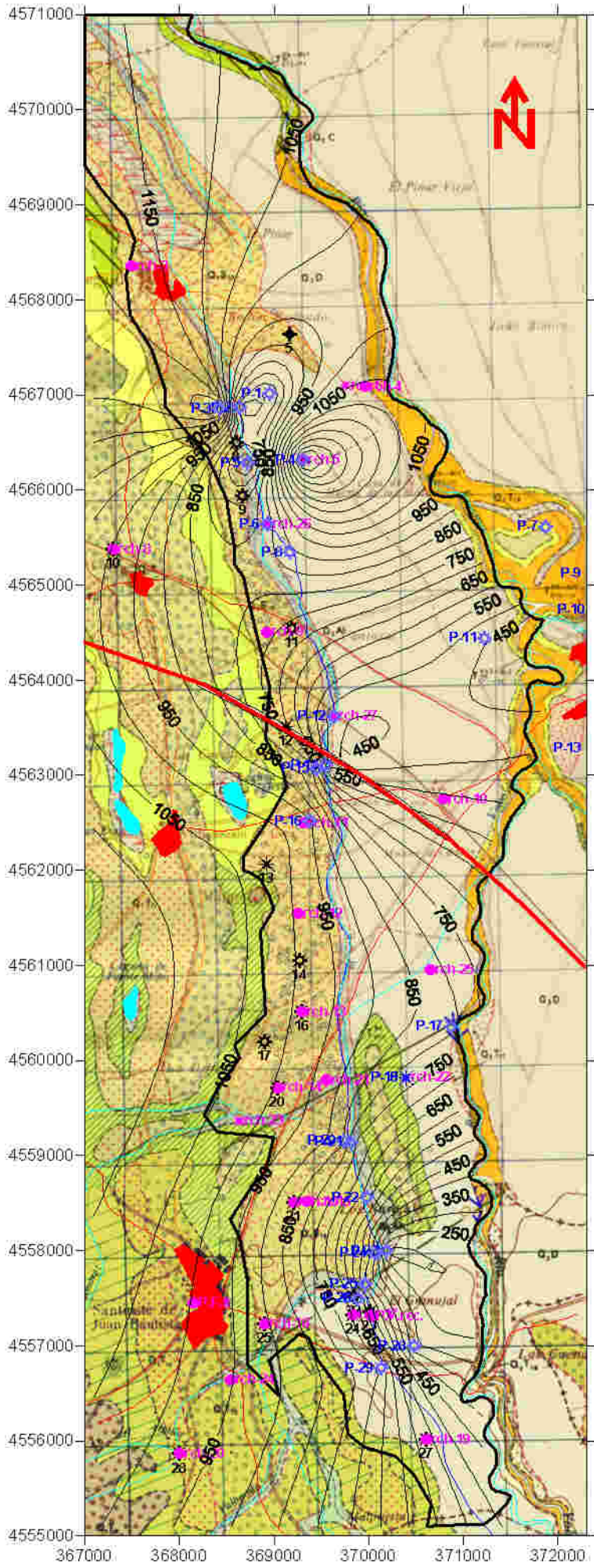
Problemas de financiación (ZA), (-).	
Impactos inherentes a la construcción del caz de AR (ZA), (-).	
Expropiaciones (ZA), (+/-).	
Movimiento de tierras (ZA), (-).	
Desmontes y terraplenes (ZA), (-).	
Compactación de tierras (ZA), (-).	
Transporte de materiales (ZA), (-).	
Movimiento de maquinaria pesada (ZA), (-).	
Acopio de materiales (ZA), (-).	
Vertido de desechos (ZA), (-).	
Efecto barrera por creación de estructuras lineales con pasos elevados (ZA), (-).	
Tendido de la tubería de conducción (ZA), (-).	
Construcción del azud y del canal de recarga (ZA), (-).	
Construcción de otras obras de fábrica (ZA), (-).	
Tendido de cables eléctricos (ZA), (-).	
Residuos generados (ZA), (-).	
Temporales.	
Permanentes:	
Trabajos de conservación (fase de explotación) (ZA), (-).	
Humos.	
Ruidos.	
Polvo.	
Etc.	

Tabla 2. Listado de chequeo de impactos para una zona sometida a operaciones de recarga artificial con objetivos medioambientales. Fase sinoperacional. División zonal asociada a cada impacto: ZA es la zona de actuación, y ZI la de intervención. Signo del impacto.

• Fase postoperacional

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
Aprovechamiento de recursos hidráulicos excedentes (ZI), (+).	
Formación de nuevas comunidades vegetales y faunísticas en torno al azud (ZA).	
Creación de nuevos humedales. (ZI y ZA), (+).	
Modificación del paisaje en torno al azud (ZA), (-/+).	
Recuperación de humedales en la zona de recarga. (ZI y ZA), (+).	
Rentabilización de las inversiones en instalaciones electromecánicas de los pozos de la zona (ZA), (+).	
Recuperación del nivel económico (ZI y ZA), (+).	
Estabilización de la población en las zonas rurales afectadas (ZI y ZA), (+).	
Modificación del régimen fluvial del río Voltoya (ZI y ZA), (-).	
Modificación del nivel freático del río. (ZI y ZA), (-).	
Alteración de cubierta vegetal en la zona ocupada por el azud. (ZI y ZA), (-).	
Ocupación permanente por la conducción de suelos con especies arbóreas de raíz profunda (ZA), (-/+).	
Perturbación de las comunidades faunísticas. (ZI y ZA), (-).	
Alteración de la cubierta vegetal en dispositivos (ZI y ZA), (-).	
De conducción.	
De distribución.	
De pretratamiento.	
Etc. (-).	
Problemas de colmatación de los dispositivos de recarga (ZA), (-).	
Producción de residuos de obra como consecuencia del mantenimiento (ZA), (-).	
Actividades de limpieza y mantenimiento en la vía de servicio (ZA), (-).	
Generación de residuos (ZA), (-).	
Molestias diversas (ZA), (-).	
Cortes al tráfico, etc.	
Introducción de especies exóticas (ZA), (-/?).	
Colmatación del acuífero (ZA), (-).	

Tabla 3. Listado de chequeo de impactos para una zona sometida a operaciones de recarga artificial con objetivos medioambientales. Fase postoperacional. División zonal asociada a cada impacto: ZA es la zona de actuación, y ZI la de intervención. Signo del impacto.



LEYENDA MAPA BASE:

CATEGORÍA	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	PERITIVO	Q2 A1
		Q2 B1
		Q2 C
		Q2 D
		Q1 T18
		Q1 S15
	MEDIO	Q1 T14
		Q1 T13
		Q1 T12
		Q1 T11
		Q1 T10
		Q1 T9
	TERCERO	Q1 T8
		Q1 T7
		Q1 T6
		Q1 T5
		Q1 T4
		Q1 T3
TERCERO	PERITIVO	T B2/C11
		T B2/C10
		T B2/C9
		T B2/C8
		T B2/C7
		T B2/C6
	MEDIO	T B2/C5
		T B2/C4
		T B2/C3
		T B2/C2
		T B2/C1
		T B2/C0

- Q2 A1: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q2 B1: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q2 C: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q2 D: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T18: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 S15: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T14: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T13: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T12: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T11: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T10: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T9: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T8: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T7: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T6: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T5: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T4: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- Q1 T3: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C11: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C10: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C9: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C8: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C7: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C6: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C5: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C4: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C3: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C2: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C1: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.
- T B2/C0: Material de arena gruesa y limosa cohesiva.

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario

RCC - POSTOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m

RCH-99 - PREOPERACIONAL

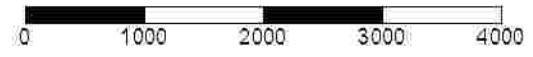
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

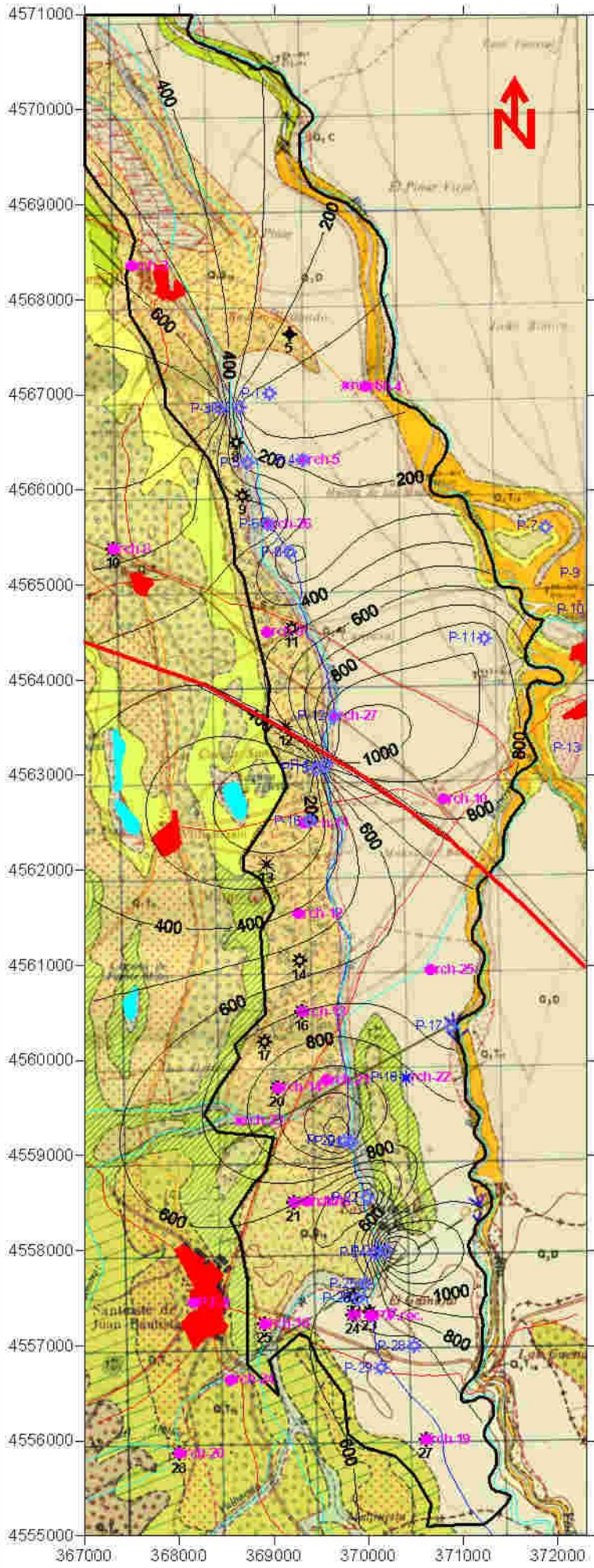
- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m



ESCALA 1:50.000

**CUBETA DE SANTIUSTE
CARTOGRAFÍA DE ISOCONDUCTIVIDADES**

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN MICROSIEMENS/CM



LEYENDA MAPA BASE:

EPOCAS	PERIODO	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	PRETERCARIO	Q2 XI	Aluviones de arena y limo con arcilla fina arenosa
		Q2 XII	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q2 XIII	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q1 XIV	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q1 XV	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
	TERCARIO	Q1 XVI	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q1 XVII	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q1 XVIII	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q1 XIX	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		Q1 XX	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
TERCARIO	PRETERCARIO	T 1	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 2	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 3	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 4	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 5	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
	TERCARIO	T 6	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 7	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 8	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 9	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
		T 10	Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa

- Q2 XI Aluviones de arena y limo con arcilla fina arenosa
- Q2 XII Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q2 XIII Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XIV Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XV Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XVI Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XVII Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XVIII Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XIX Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- Q1 XX Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 1 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 2 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 3 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 4 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 5 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 6 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 7 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 8 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 9 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa
- T 10 Aluviones de arena, arcilla fina y limo con arcilla fina arenosa

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario

RCC - POSTOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m

RCH-99 - PREOPERACIONAL

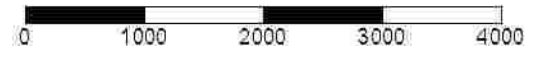
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

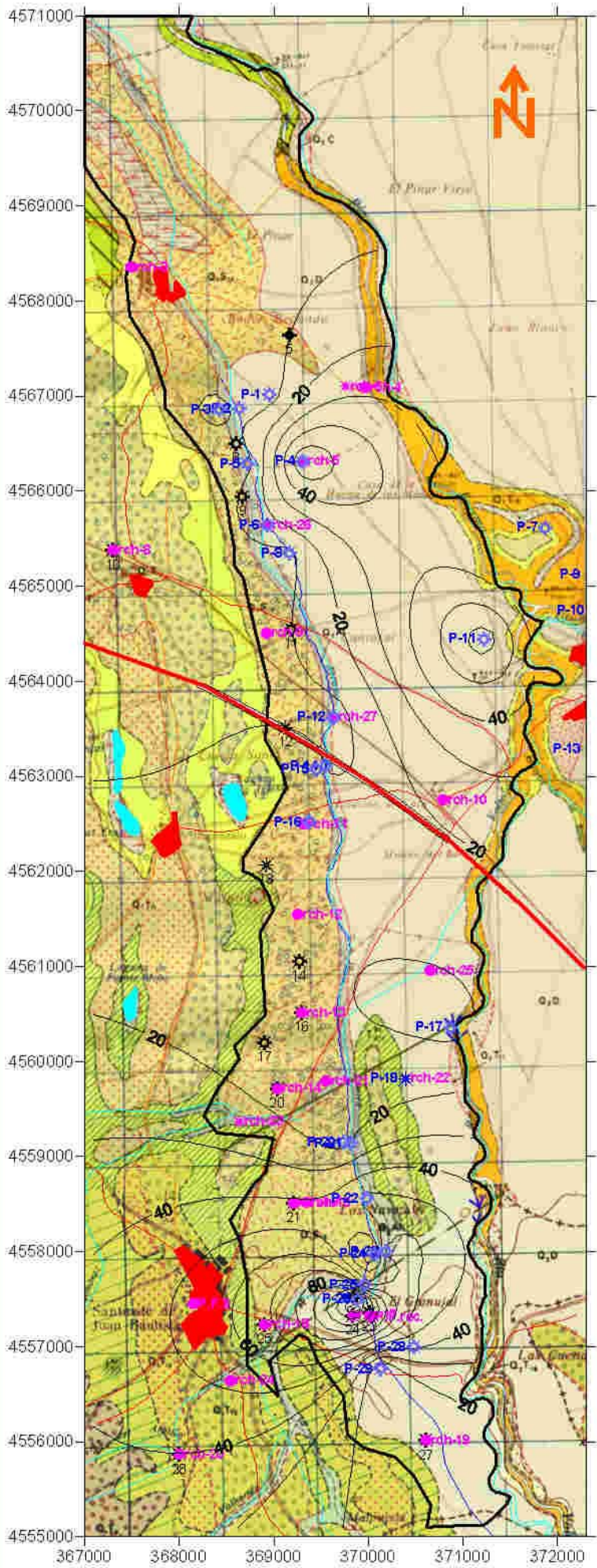
- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m



ESCALA 1:50.000

**CUBETA DE SANTIUSTE
CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS
HIERRO TOTAL**

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l



LEYENDA MAPA BASE:

CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
CUATERNARIO	FLUVIOGLACIAL	Q1 A1	Aluviales de arena y limo con o sin materia orgánica
		Q1 T10	Depositos de arena arenolimososa y limosa, arena, limo y arcilla con alto contenido
		Q1 T11	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T12	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T13	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T14	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
	FLUVIOGLACIAL	Q1 T15	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T16	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T17	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T18	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T19	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		Q1 T20	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
CUATERNARIO	FLUVIOGLACIAL	T B2/2011	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2012	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2013	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2014	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2015	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2016	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
	FLUVIOGLACIAL	T B2/2017	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2018	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2019	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2020	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2021	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
		T B2/2022	Depositos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena

- Q1 A1 Aluviales de arena y limo con o sin materia orgánica
- Q1 T10 Depósitos de arena arenolimososa y limosa, arena, limo y arcilla con alto contenido
- Q1 T11 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T12 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T13 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T14 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T15 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T16 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T17 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T18 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T19 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- Q1 T20 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2011 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2012 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2013 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2014 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2015 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2016 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2017 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2018 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2019 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2020 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2021 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena
- T B2/2022 Depósitos de arena arena limosa (arenolimososa) y arcilla de arena

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario

RCC - POSTOPERACIONAL
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m

RCH-99 - PREOPERACIONAL

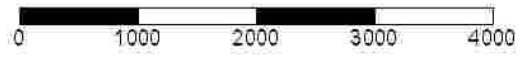
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

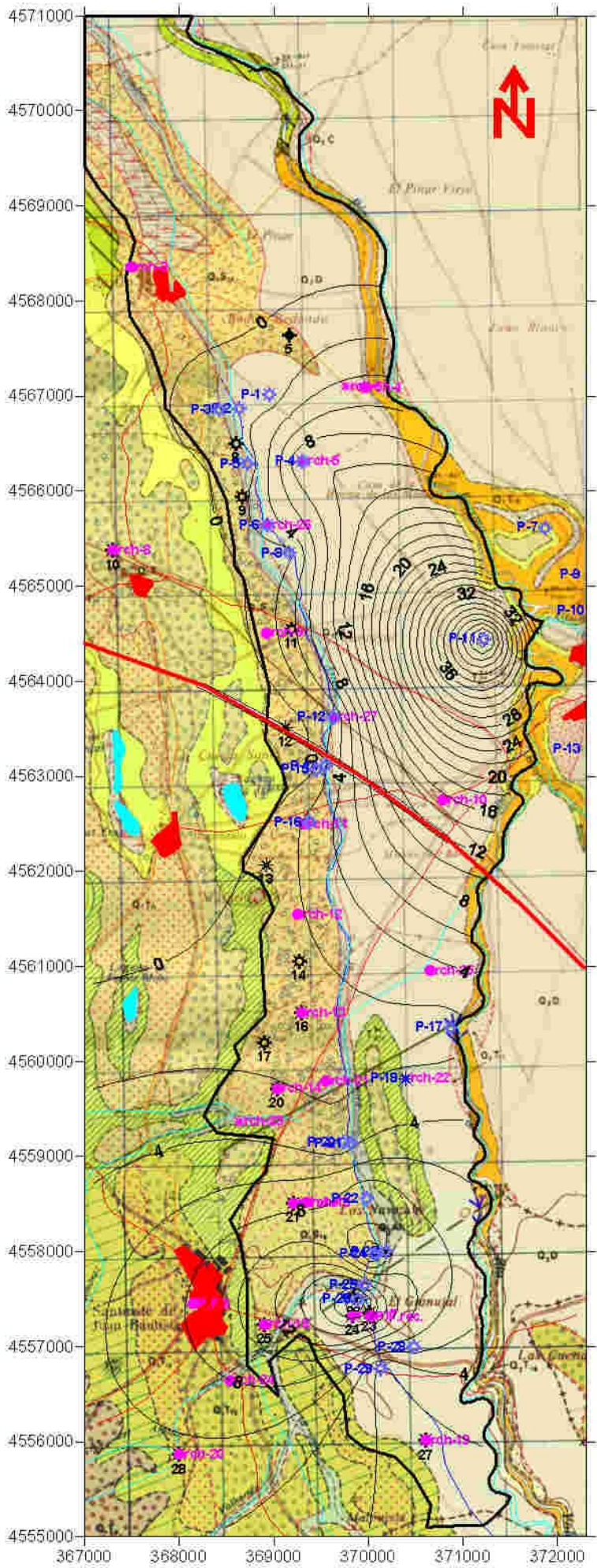
- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m



ESCALA 1:50.000

**CUBETA DE SANTIUSTE
CARTOGRAFÍA DE ISOCONTENIDOS
IÓN NITRATO**

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN mg/l



LEYENDA MAPA BASE:

Escala	Simbología	Descripción	Código
CUATERNARIO	ALUVIO	Aluvión de arena y grava con y sin materia orgánica	Q1 A1
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T11
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T12
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T13
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T14
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T15
	MARC	Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T16
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T17
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T18
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T19
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T20
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	Q1 T21
TERRESTRE	ALUVIO	Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	T B1 C11
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	T B1 C12
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	T B1 C13
	MARC	Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	T B1 C14
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	T B1 C15
		Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica	T B1 C16

- Q1 A1 Aluvión de arena y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T11 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T12 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T13 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T14 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T15 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T16 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T17 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T18 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T19 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T20 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- Q1 T21 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- T B1 C11 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- T B1 C12 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- T B1 C13 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- T B1 C14 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- T B1 C15 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica
- T B1 C16 Aluvión de arena, limo y grava con y sin materia orgánica

LEYENDA:

- Núcleo urbano
- Red hidrográfica
- Humedales
- Carreteras/TAV
- Envolvente acuífero cuaternario

RCC - POSTOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m

RCH-99 - PREOPERACIONAL

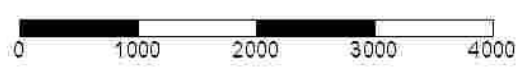
CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 75 m.
- ENTRE 75 Y 150 m
- SUPERIOR A 150 m

RCH-03 - SINOPERACIONAL

CAPTACIÓN DE PROFUNDIDAD:

- INFERIOR A 50 m.
- SUPERIOR A 50 m



ESCALA 1:50.000

**CUBETA DE SANTIUSTE
CARTOGRAFÍA DE ISORRELACIONES
IÓNICAS NITRATOS/OXIGENO DISUELT**

VALORES DE LAS ISOLÍNEAS
EXPRESADOS EN meq/l

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

3.1.5. HUMEDALES DEL COMPLEJO COCA-OLMEDO

3.1.5.1. INVENTARIO Y TIPIFICACIÓN

3.1.5.2. RESULTADOS ANALÍTICOS

3.1.5.3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INESTABLES



OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

**HUMEDALES EN EL SISTEMA.
INVENTARIO PARA EL VERANO DE 2003**

Nº	TIPO	NOMBRE	LOCALIDAD	X	Y	Z
1	ROJO		AGUASAL	363023	4574355	750,5
2	AZUL	Laguna de las Eras	AGUASAL	363298	4574254	750,6
3	AZUL		AGUASAL	363272	4574192	750,6
4	ROJO		AGUASAL	363055	4574177	750,1
5	AZUL		AGUASAL	363178	4574046	750,3
6	AZUL	Juncarral	AGUASAL	362876	4574044	749,0
7	AZUL	Bodón de la Liebre	AGUASAL	363580	4571974	754,5
8	AZUL	Bodón de la Crijota	AGUASAL	363181	4571973	753,6
9	AZUL		AGUASAL	363308	4571934	753,9
10	AZUL		AGUASAL	363648	4571809	754,4
11	AZUL		LLANO DE OLMEDO	364202	4571656	755,8
12	AZUL	Bodón Guarrero	LLANO DE OLMEDO	364467	4571575	757,0
13	ROJO	El Horno	LLANO DE OLMEDO	366213	4570738	761,1
14	ROJO		LLANO DE OLMEDO	366747	4570506	762,4
15	AZUL	Bodón de la Vega	LLANO DE OLMEDO	366407	4570320	762,5
16	ROJO	AGUA CABALLO	VILLEGUILLO	367496	4570188	764,7
17	AZUL	La Cárcaba	LLANO DE OLMEDO	365458	4570158	762,6
18	NARANJA		LLANO DE OLMEDO	365095	4570039	772,2
19	AZUL	Los Majuelos	LLANO DE OLMEDO	364390	4570049	778,2
20	ROJO		VILLEGUILLO	367740	4570024	765,3
21	ROJO	La Cochina	LLANO DE OLMEDO	365783	4570020	763,8
22	NARANJA	Ermita Llano de Olmedo	LLANO DE OLMEDO	364825	4569739	779,7
23	AZUL	CARCAVA GRANDE	AGUASAL	361753	4570906	758,0
24	NARANJA		AGUASAL	361573	4570906	758,0
25	AMARILLO		AGUASAL	361410	4571053	759,0
26	AZUL		AGUASAL	362997	4571729	759,0
27	AZUL		AGUASAL	361671	4570562	759,0
28	AZUL	CARCAVA CHICA	AGUASAL	361733	4570619	759,0
29	AZUL	El Medianero	VILLEGUILLO	366739	4569680	764,6
30	AMARILLO	Las Dehesillas	VILLEGUILLO	368349	4569105	767,6
31	NARANJA		VILLEGUILLO	367194	4569144	767,7
32	AMARILLO	EL ARENERO	VILLEGUILLO	367129	4568786	776,0
33	NARANJA		VILLEGUILLO	366283	4568485	772,0
34	ROJO		VILLEGUILLO	367714	4568197	769,8
35	AMARILLO		VILLEGUILLO	366335	4568177	768,5
36	NARANJA	BODON REDONDO	VILLEGUILLO	369045	4567899	770,7
37	NARANJA		VILLEGUILLO	369611	4567868	771,5
38	AZUL	LAGUNA DE VALDEPERILLÁN	LLANO DE OLMEDO	364791	4567848	762,8
39	AMARILLO		VILLEGUILLO	365917	4567840	768,3
40	AZUL	LAGUNA DE CABALLO ALBA	VILLEGUILLO	365529	4567306	768,7
41	AMARILLO		VILLEGUILLO	367367	4566909	788,3
42	AMARILLO		VILLEGUILLO	366217	4566602	772,9
43	AZUL		FUENTE-OLMEDO	364150	4566613	774,6
44	AMARILLO	LOS POZUELOS	FUENTE DE SANTA CRUZ	365167	4566375	772,4
45	AZUL		CIRUELOS DE COCA	367263	4565494	794,9
46	AZUL		CIRUELOS DE COCA	367272	4565455	794,8
47	AMARILLO		CIRUELOS DE COCA	366162	4565362	775,4
48	AMARILLO		CIRUELOS DE COCA	367390	4565180	795,7
49	AZUL		CIRUELOS DE COCA	367354	4565070	795,6
50	AZUL		CIRUELOS DE COCA	367451	4564778	797,0
51	AZUL		CIRUELOS DE COCA	367525	4564520	798,2
52	ROJO		COCA	369709	4563554	783,0
53	NARANJA	LAGUNA DE VALDERUEDAS	VILLAGONZALO DE COCA	367332	4563161	799,0
54	ROJO		VILLAGONZALO DE COCA	368141	4563197	802,1

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

55	ROJO		VILLAGONZALO DE COCA	367991	4563036	803,8
56	AZUL	LAGUNA DE LA IGLESIA	VILLAGONZALO DE COCA	368570	4562726	786,9
57	AZUL	Laguna de las Eras	VILLAGONZALO DE COCA	367434	4562545	798,1
58	NARANJA		VILLAGONZALO DE COCA	367601	4561954	808,2
59	NARANJA		VILLAGONZALO DE COCA	366912	4561831	807,3
60	AMARILLO	EL BODO	BERNUY DE COCA	365036	4561291	811,3
61	ROJO		VILLAGONZALO DE COCA	367182	4561024	817,9
62	AZUL	FUENTE MIÑOR	VILLAGONZALO DE COCA	367446	4560584	812,8
63	AMARILLO		BERNUY DE COCA	365378	4560000	820,3
64	AMARILLO		BERNUY DE COCA	365240	4559907	824,5
65	AMARILLO		SANTIUSTE DE SAN J & B	368301	4559261	801,7
66	AZUL	BODÓN DE LA HIRUELA	SANTIUSTE DE SAN J & B	368426	4559078	802,6
67	AZUL	HUMEDALES DE BERNUY	SANTIUSTE DE SAN J & B	366880	4558862	815,4
68	ROJO		SANTIUSTE DE SAN J & B	367351	4558400	824,5
69	ROJO		AGUASAL	362806	4572371	757,0
70	ROJO		AGUASAL	363358	4572241	757,0
71	ROJO		AGUASAL	362936	4571963	757,0
72	ROJO		AGUASAL	363651	4571992	757,0
73	ROJO		AGUASAL	363152	4571742	757,0
74	ROJO		LLANO DE OLMEDO	364021	4571449	762,0
75	ROJO		LLANO DE OLMEDO	364366	4571257	763,0
76	ROJO		LLANO DE OLMEDO	364558	4571080	762,0
77	ROJO		AGUASAL	364909	4573024	750,0
78	ROJO		AGUASAL	361227	4571651	750,0
79	ROJO		AGUASAL	361280	4571161	750,0
80	ROJO		AGUASAL	361083	4570830	750,0
81	ROJO		AGUASAL	363426	4574444	750,0
82	ROJO		AGUASAL	363502	4574420	750,0
83	ROJO		AGUASAL	363776	4574166	750,0

estado conservación

- 5 agua- se puede mejorar
- 4 sin agua. Se puede recuperar. Sin cultivos alrededor
- 3 sin agua. Afectada. Con cultivos alrededor
- 2 Sin agua. Afectada sustancialmente. Roturada, drenada, cultivada
- 1 Sin agua. Afectada sustancialmente. Cambio de uso.

funcionamiento

	humedal hidrodependiente
	humedal asociado a la red de escorrentía superficial NO HIDRODEPENDIENTE/endorreico
	humedal fuertemente degradado de difícil recuperación
	humedal indicial desaparecido. Encuestas, etc.

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

HUMEDALES ANÁLISIS QUÍMICOS

HUM-Nº	TIPO	NOMBRE	FECHA	X	Y	Z
19	AZUL	Los Majuelos	31-07-03	364390	4570049	778,2
46	AZUL	Ciruelos	06-08-03	367272	4565455	794,8

HUMEDAL	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO3(mg/l)	CO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	C (µS/cm)	pH c	FACIES
19	972	1.148	217	451	2.139	775	318	1.373	2,01	8790	8,74	Cl-HCO-SO4-Na-Mg
46	112,0	11,0	110,0	129,0	145,0	580,0	0	222,0	126,0	1870	8,1	HCO-Mg-Ca

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA).
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

HUMEDALES CON LÁMINA DE AGUA EN VERANO DE 2003 Y 2004
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INESTABLES

HUM-Nº	TIPO	NOMBRE	LOCALIDAD	FECHA	X	Y	Z	SUSTRATO	LAMINA	C µS/cm	pH	SALINIDAD %	TSD ppm	fecha
12	AZUL	Bodón Guarrero	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364467	4571575	757,0	SALINO	S	12000	9,0			jun-99
17	AZUL	La Cárcaba	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365458	4570158	762,6	Q-ARENOSO	S	1822	8,74	3,6	913	jul-03
19	AZUL	Los Majuelos	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364390	4570049	778,2	Q-ARENOSO	S	13040	9,01			oct-03
23	AZUL	CARCAVA GRANDE	AGUASAL	31-07-03	361753	4570906	758,0	SALINO	S	13180	9,73			oct-03
27	AZUL		AGUASAL	31-07-03	361671	4570562	759,0	SALINO	S	1130	7,86			oct-03
28	AZUL	CARCAVA CHICA	AGUASAL	06-08-03	361733	4570619	759,0	SALINO	S	3900	9,23			oct-03
45	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367263	4565494	794,9	SALINO	S	1298	8,11	2,5	650	ago-03
46	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367272	4565455	794,8	SALINO	S	2040	8,1			jun-99
49	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367354	4565070	795,6	SALINO	S	2036	8,08	4,0	1016	ago-03
57	AZUL	Laguna de las Eras	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367434	4562545	798,1	SALINA	S	23660	9,1	46,2	11,83	ago-03
66	AZUL	BODÓN DE LA HIRUELA	SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	368426	4559078	802,6	SALINA	S	3080	8,62	6,1	11,52	ago-03
67	AZUL	HUMEDALES DE BERNUY	SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	366880	4558862	815,4	SALINA	S	2368	8,85	4,6	11,83	ago-03

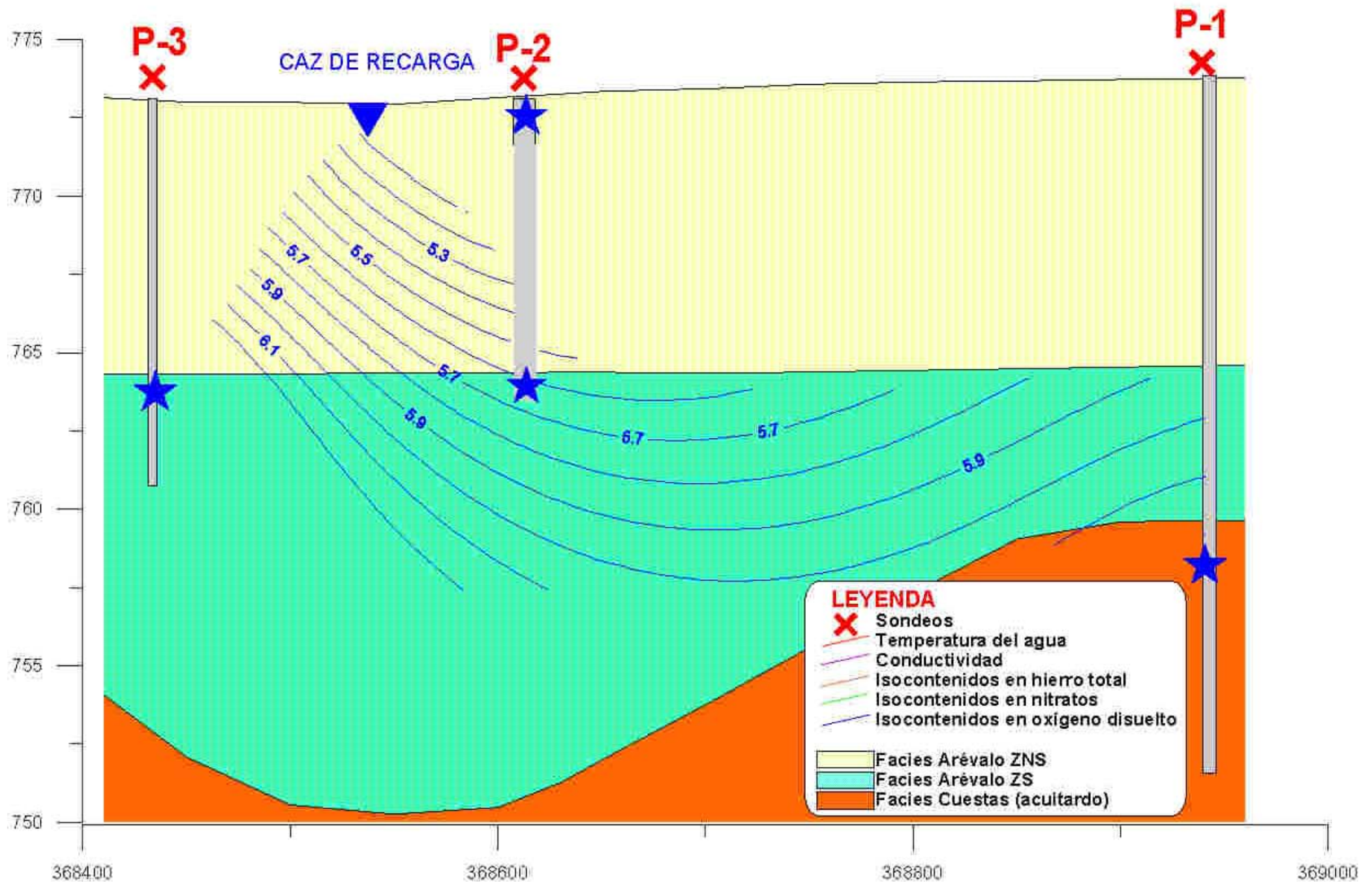
BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3-1 AGUAS

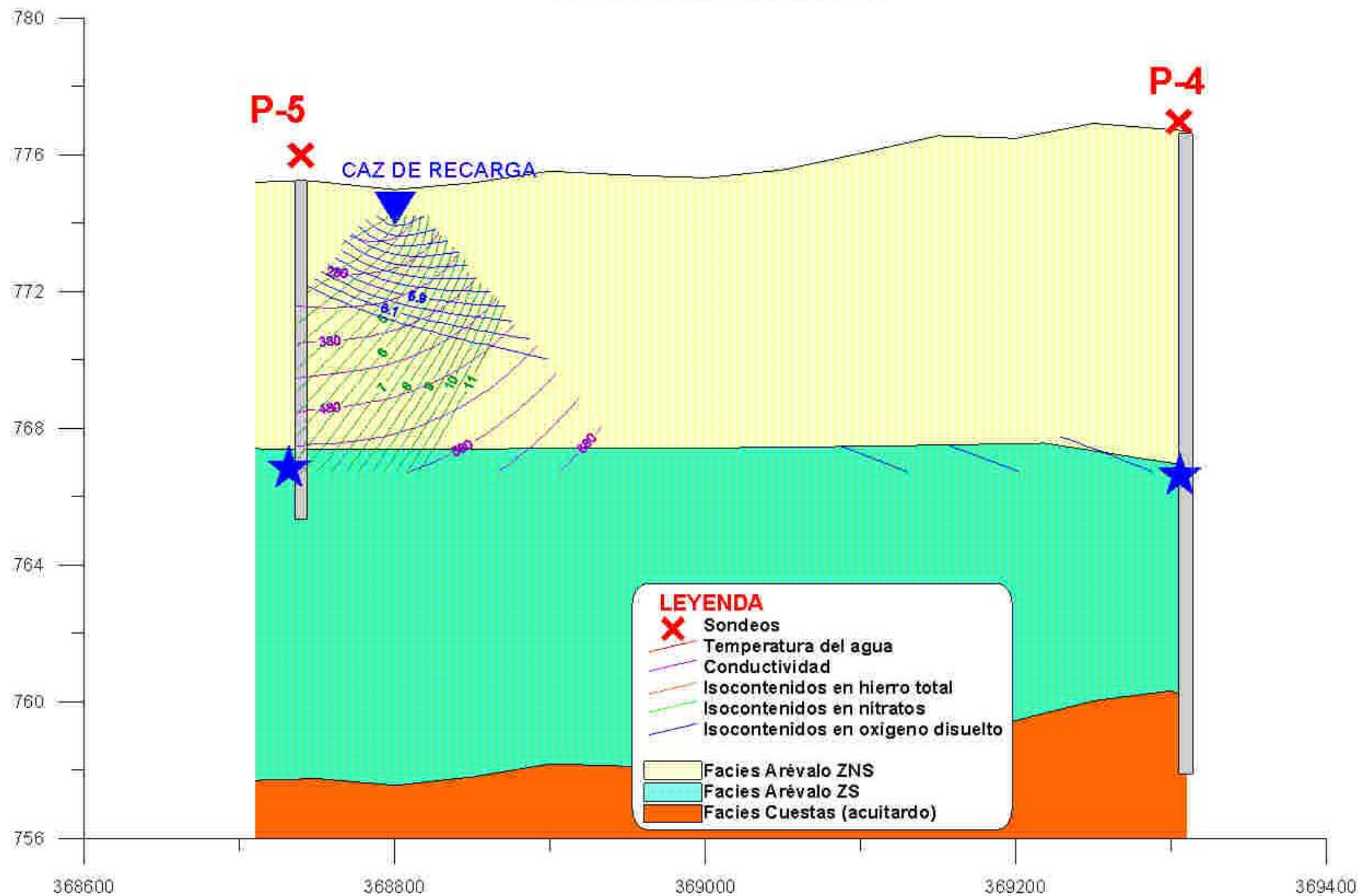
3.1.6. PERFILES HIDROQUÍMICOS



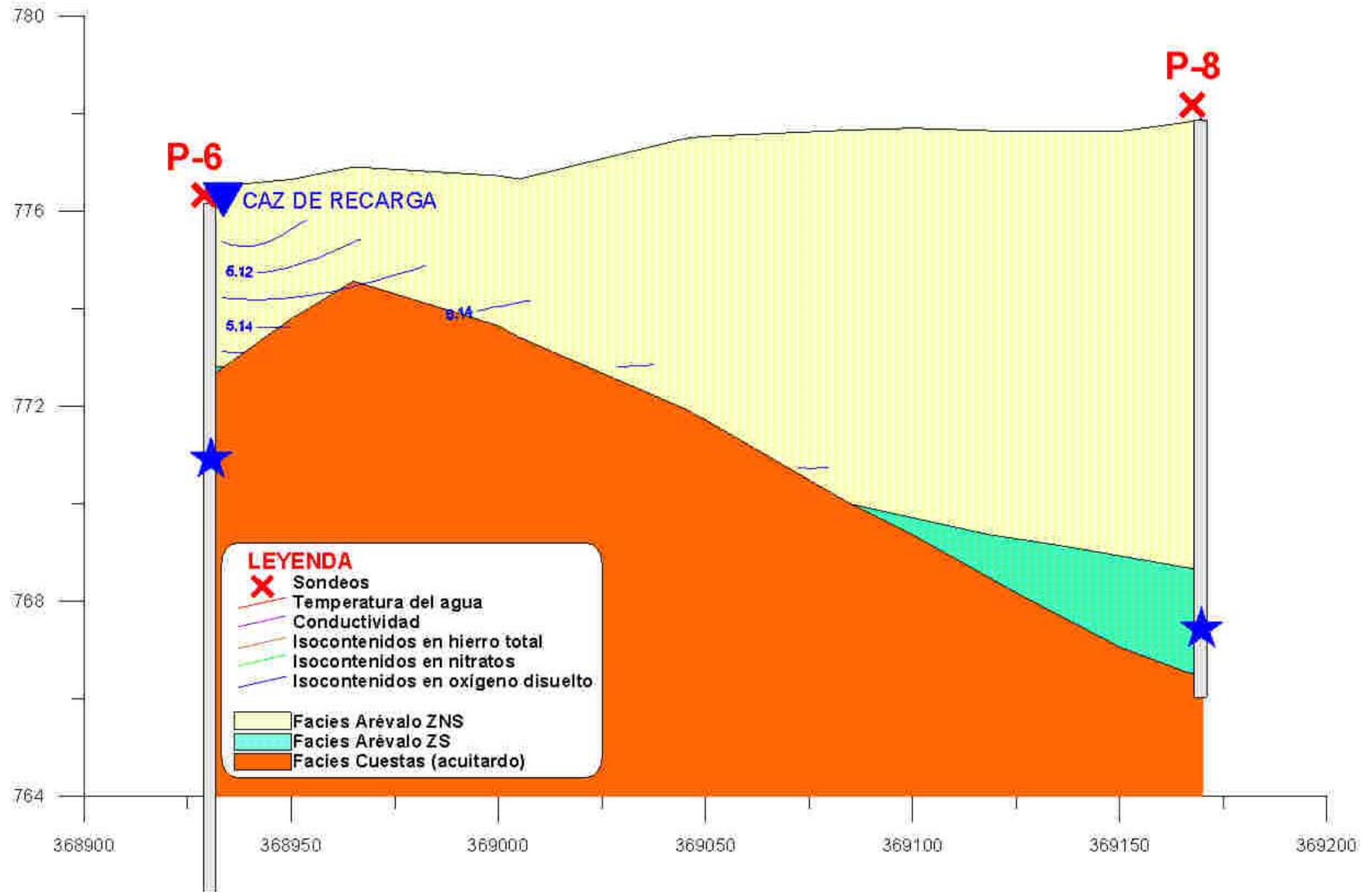
PERFIL HIDROQUÍMICO 1



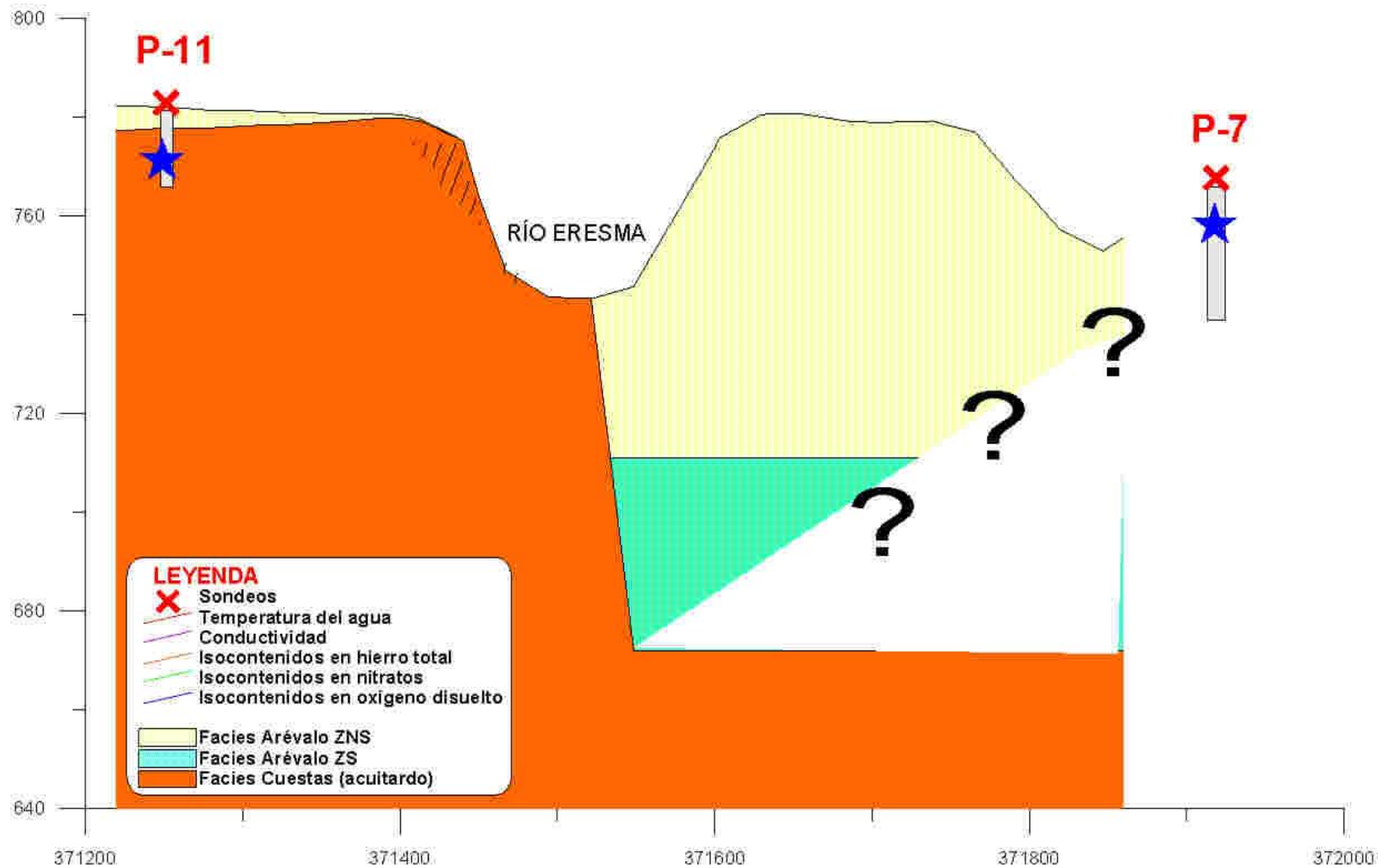
PERFIL HIDROQUÍMICO 2



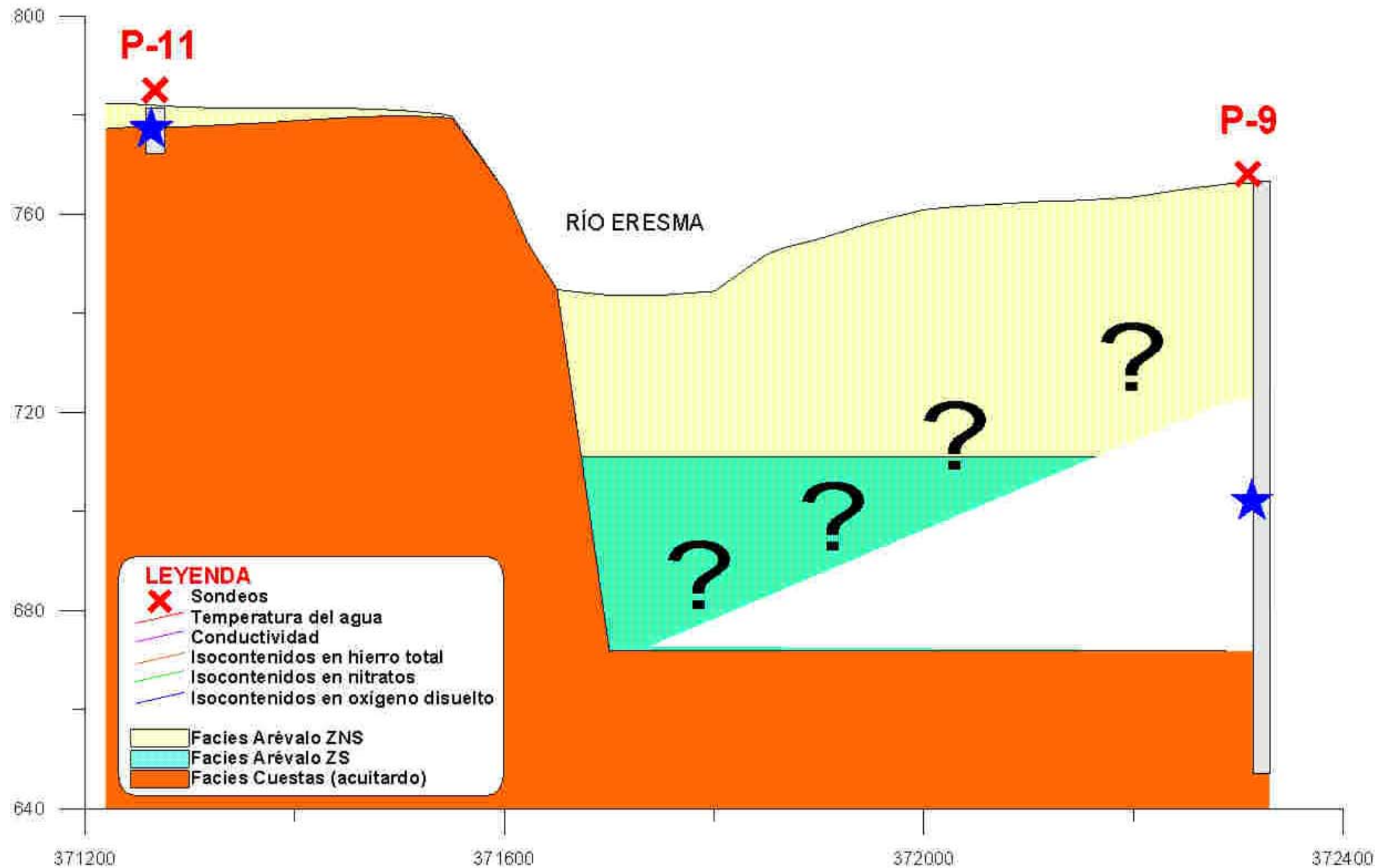
PERFIL HIDROQUÍMICO 3



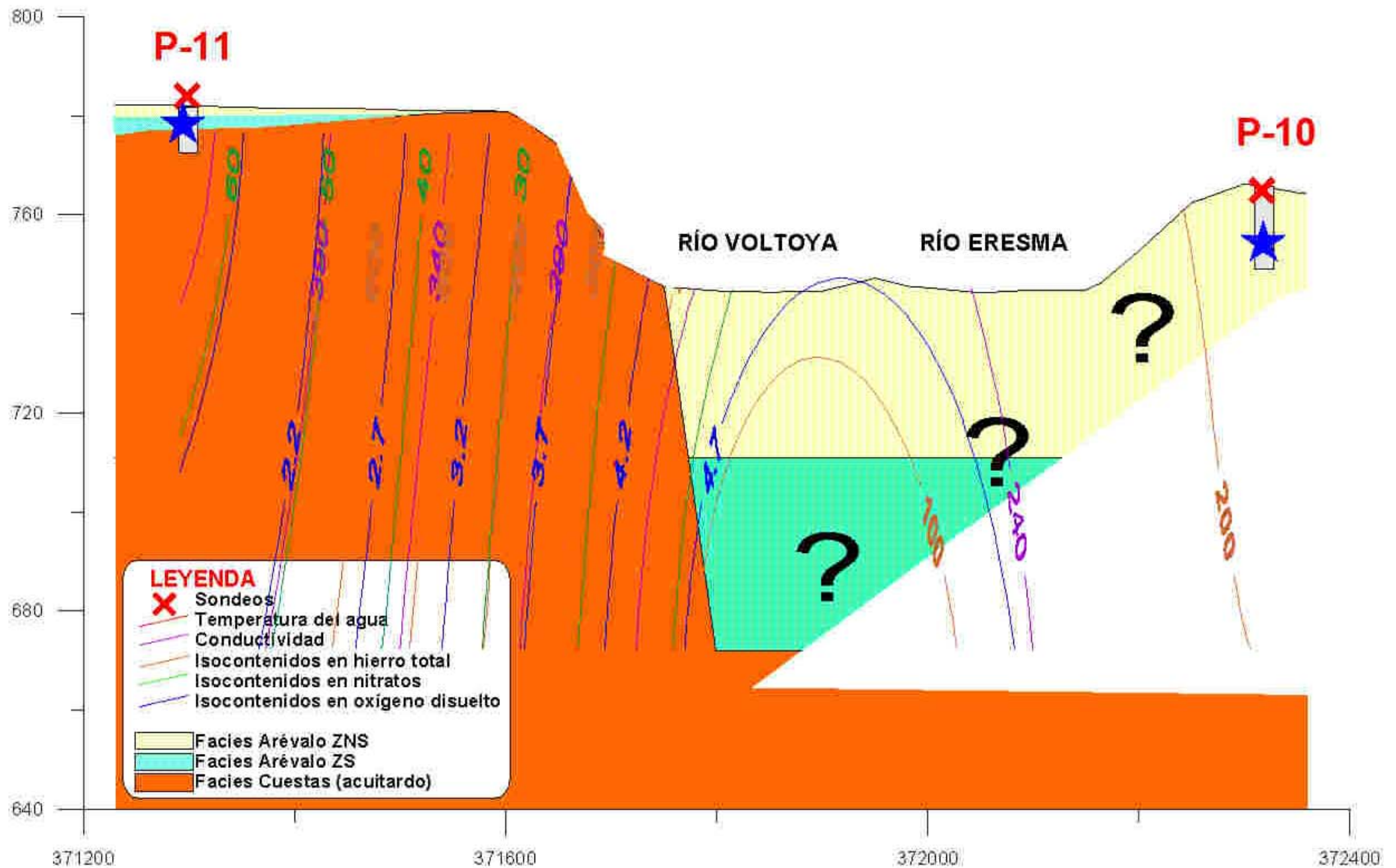
PERFIL HIDROQUÍMICO 4



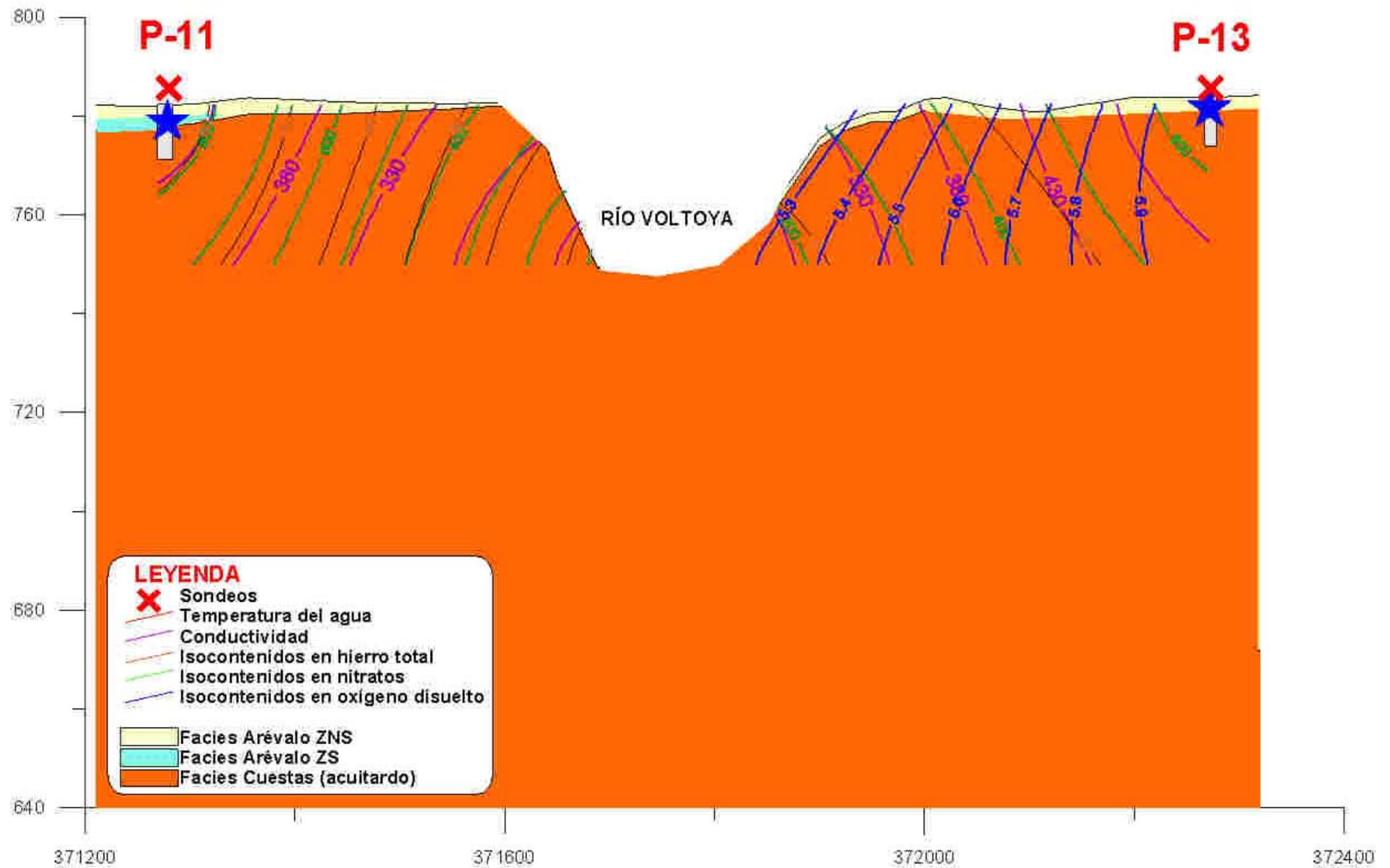
PERFIL HIDROQUÍMICO 5



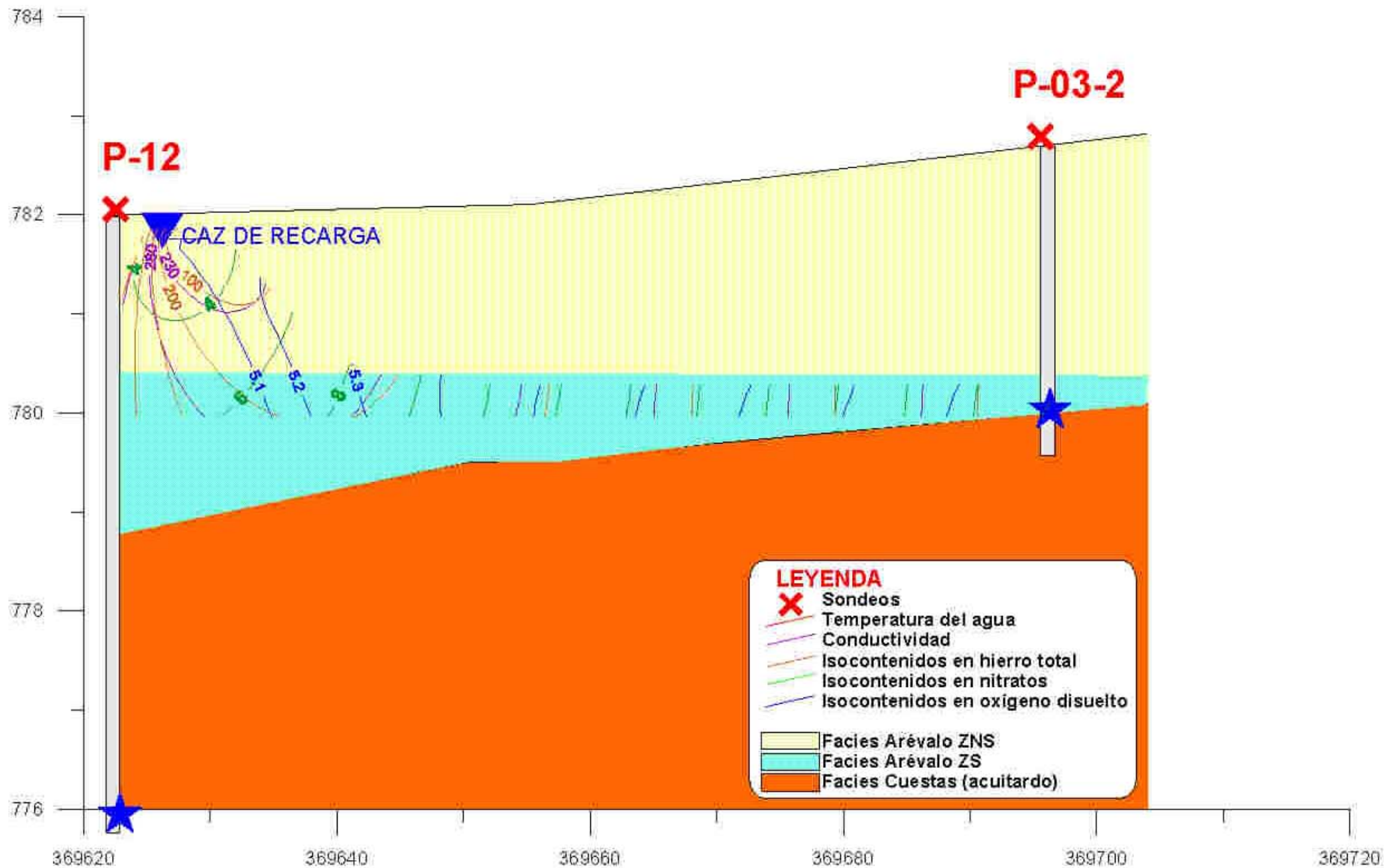
PERFIL HIDROQUÍMICO 6



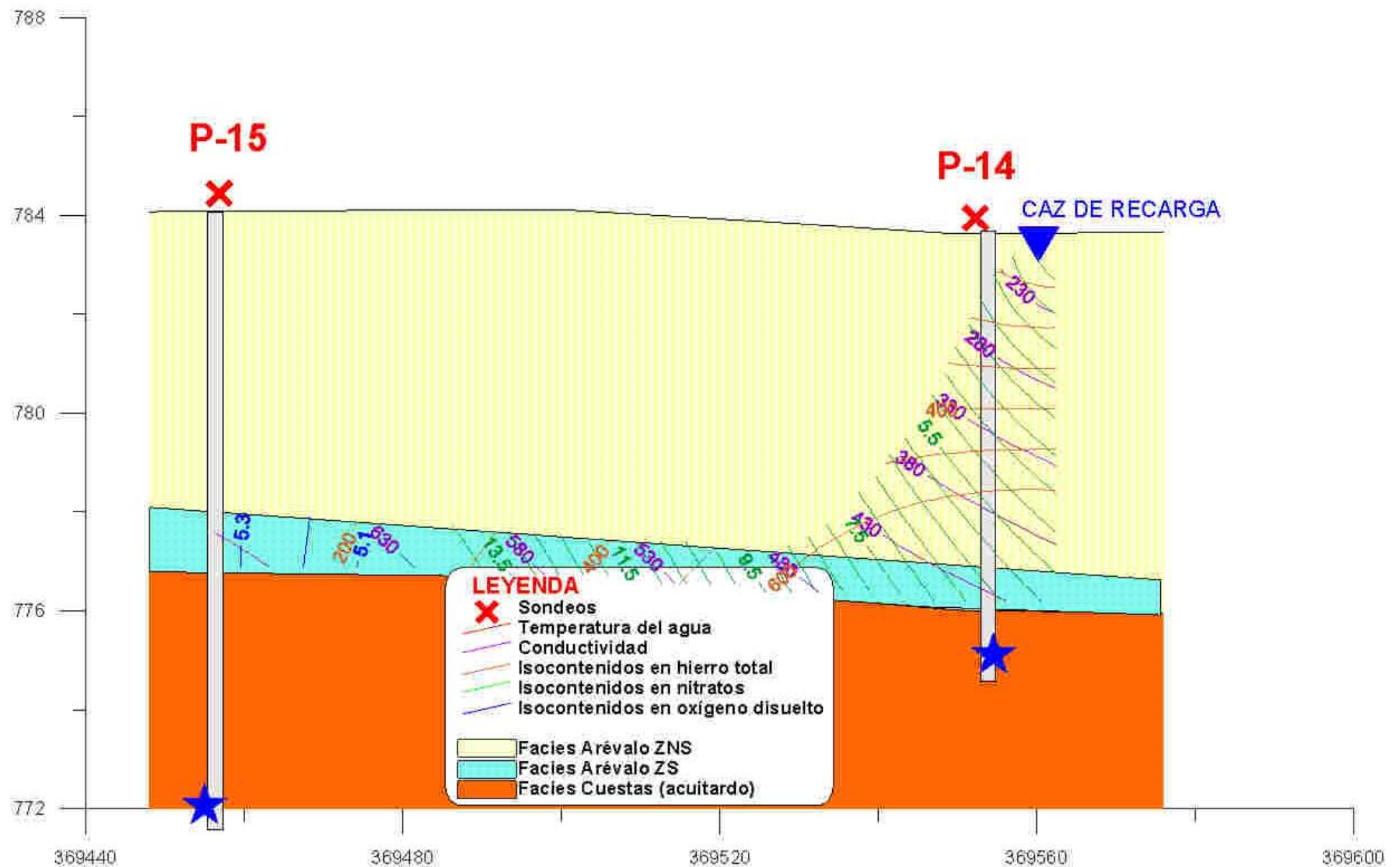
PERFIL HIDROQUÍMICO 7



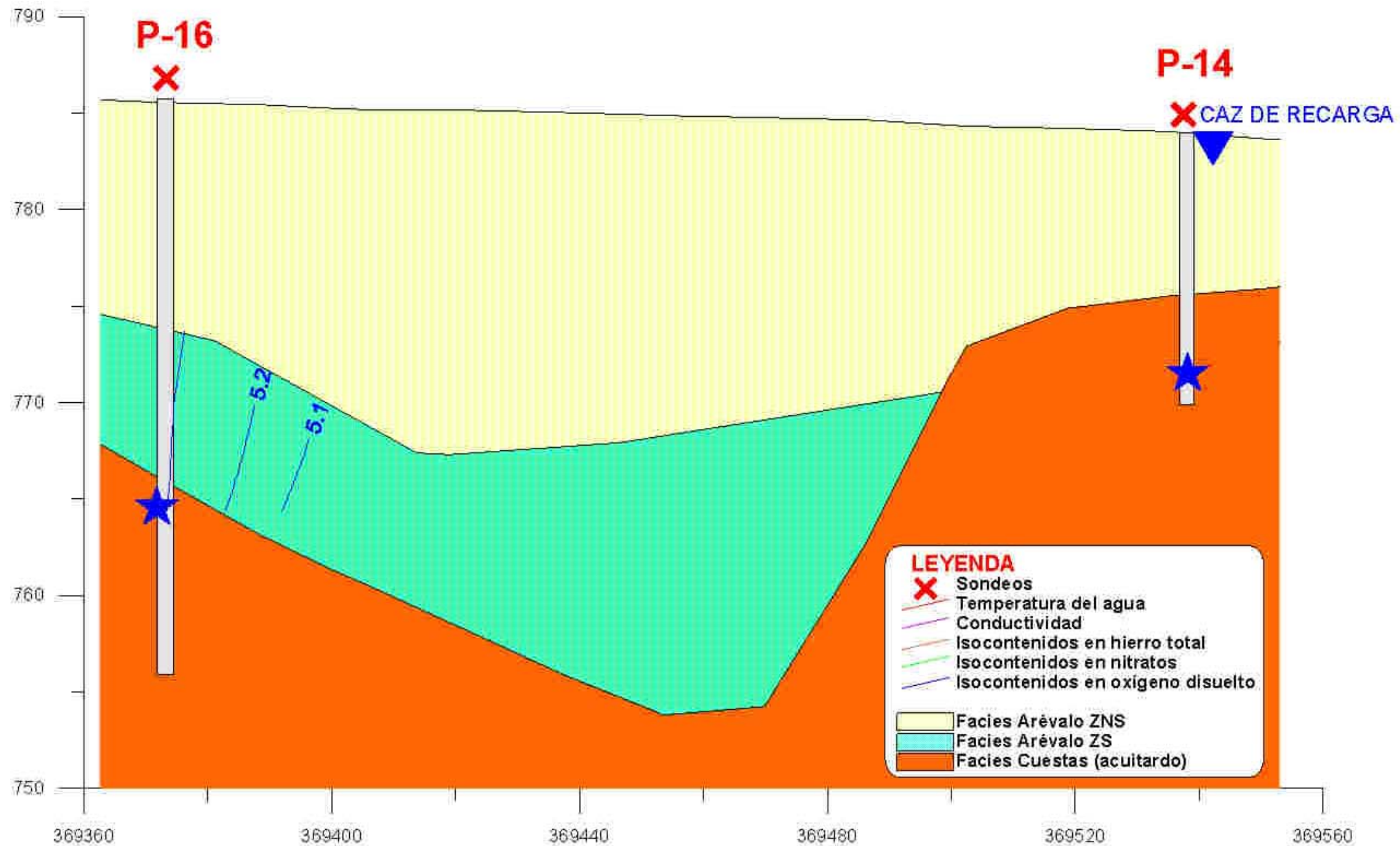
PERFIL HIDROQUÍMICO 8



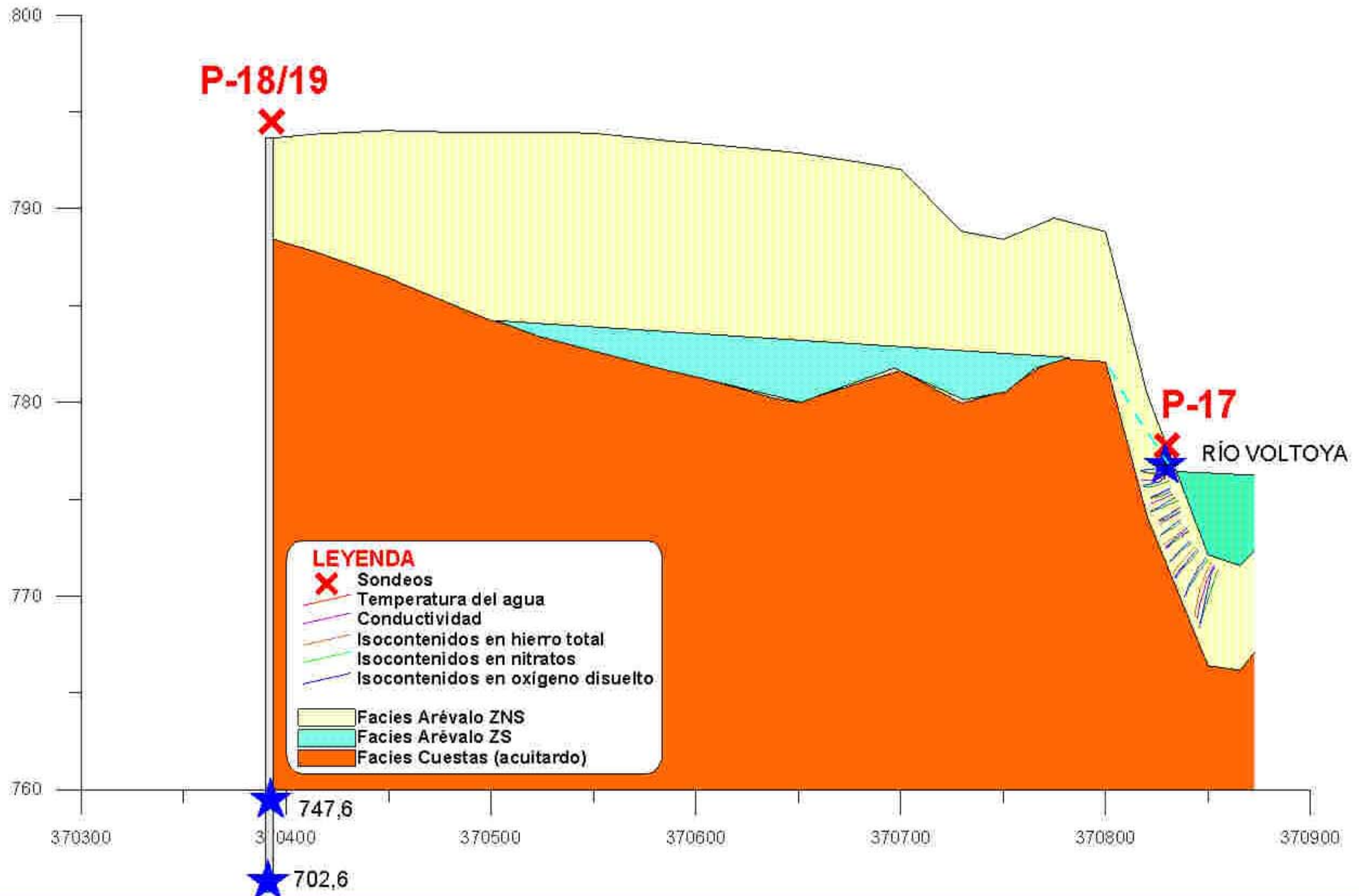
PERFIL HIDROQUÍMICO 9



PERFIL HIDROQUÍMICO 10



PERFIL HIDROQUÍMICO 11



PERFIL HIDROQUÍMICO 12

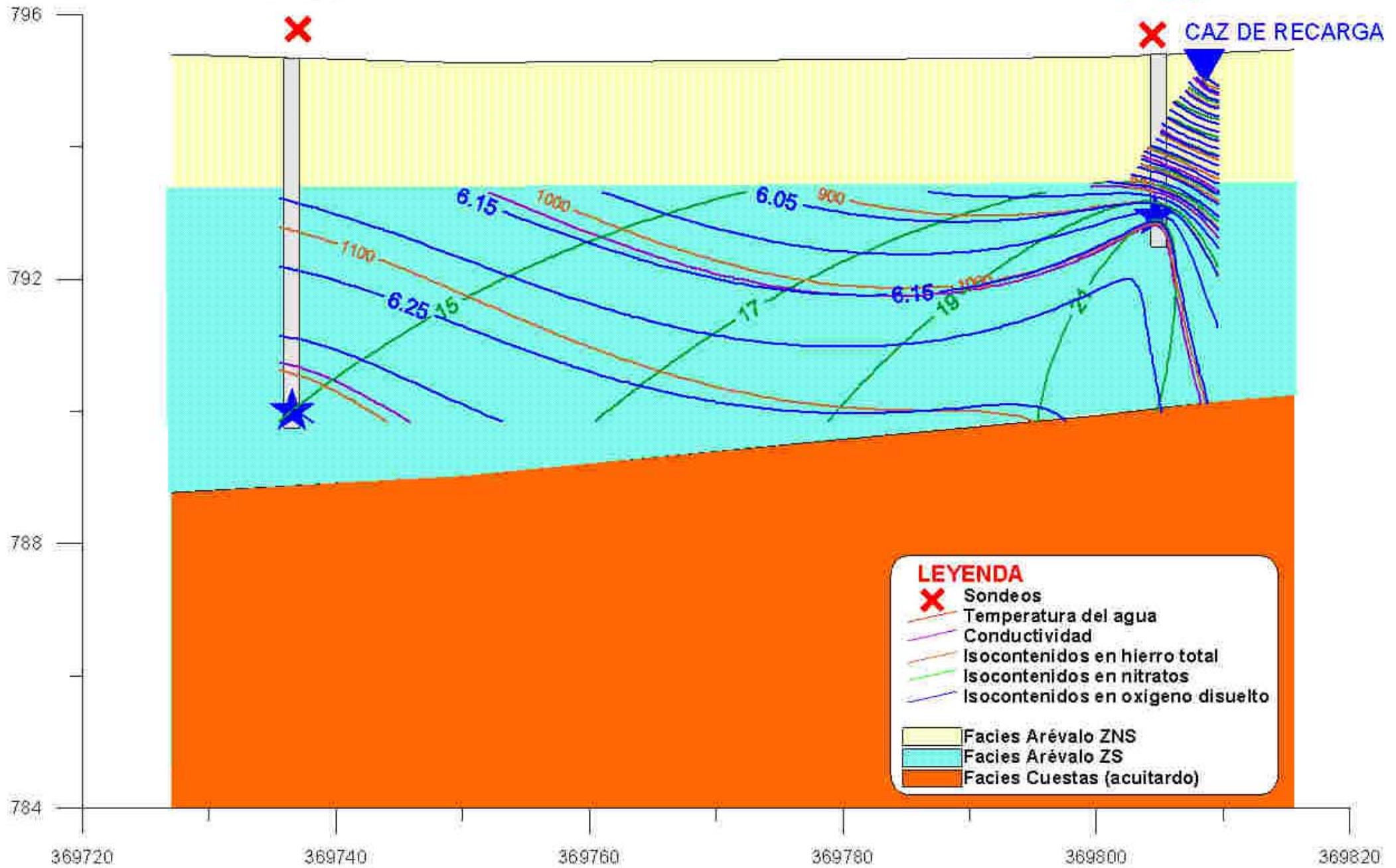
P-20



P-21



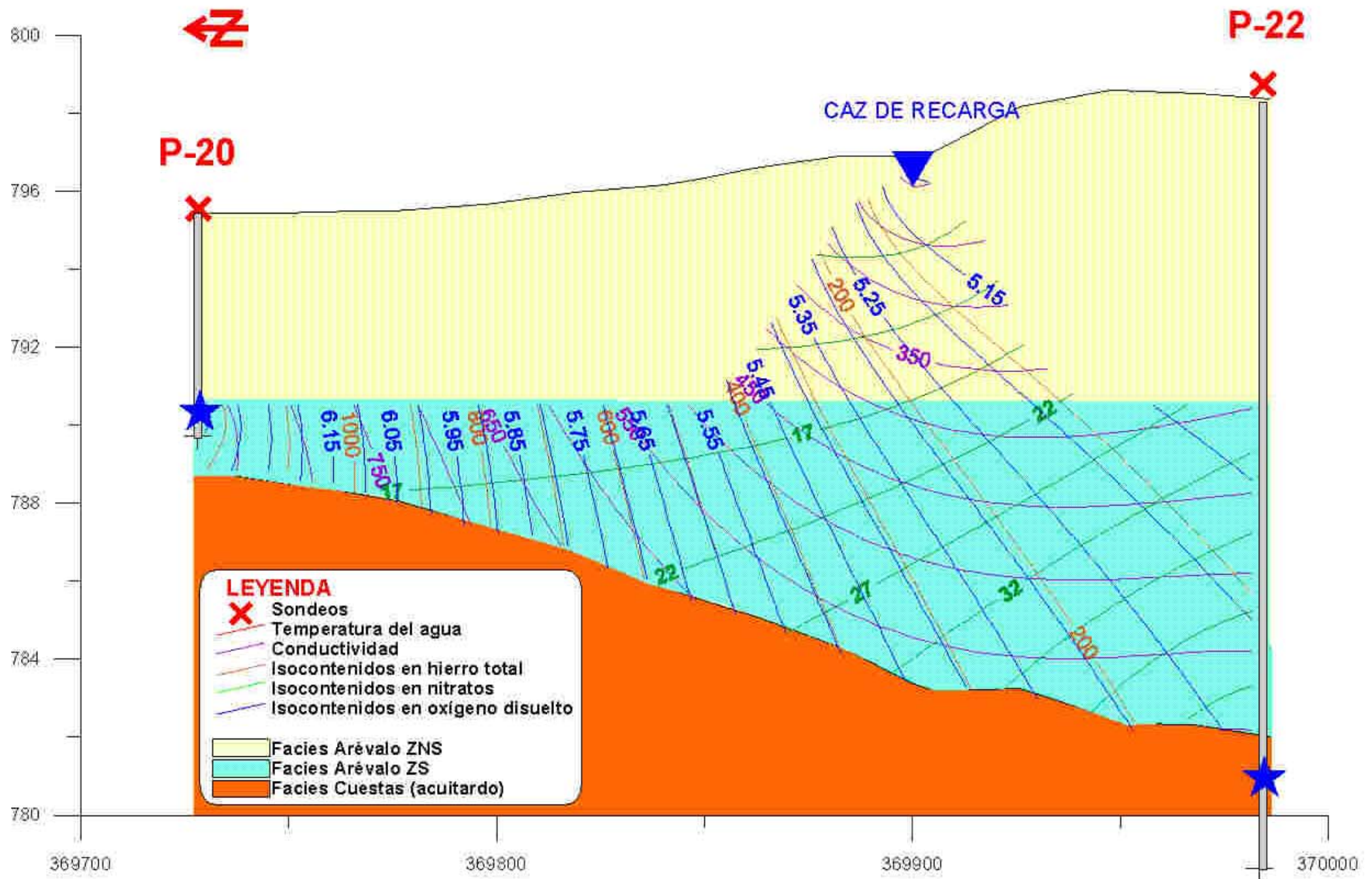
CAZ DE RECARGA



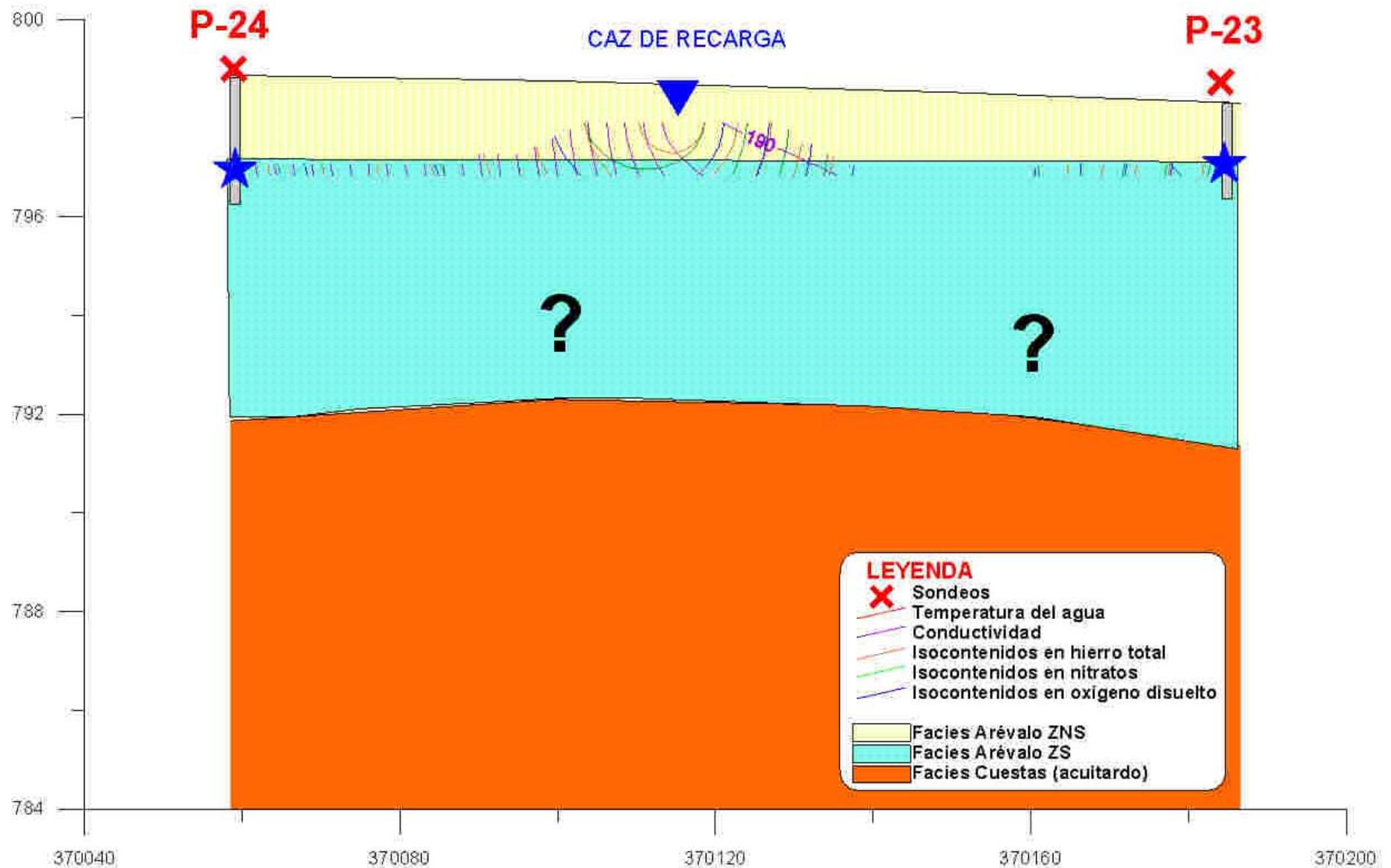
LEYENDA

- Sondeos
- Temperatura del agua
- Conductividad
- Isocontenidos en hierro total
- Isocontenidos en nitratos
- Isocontenidos en oxígeno disuelto
- Facies Arévalo ZNS
- Facies Arévalo ZS
- Facies Cuestas (acuitardo)

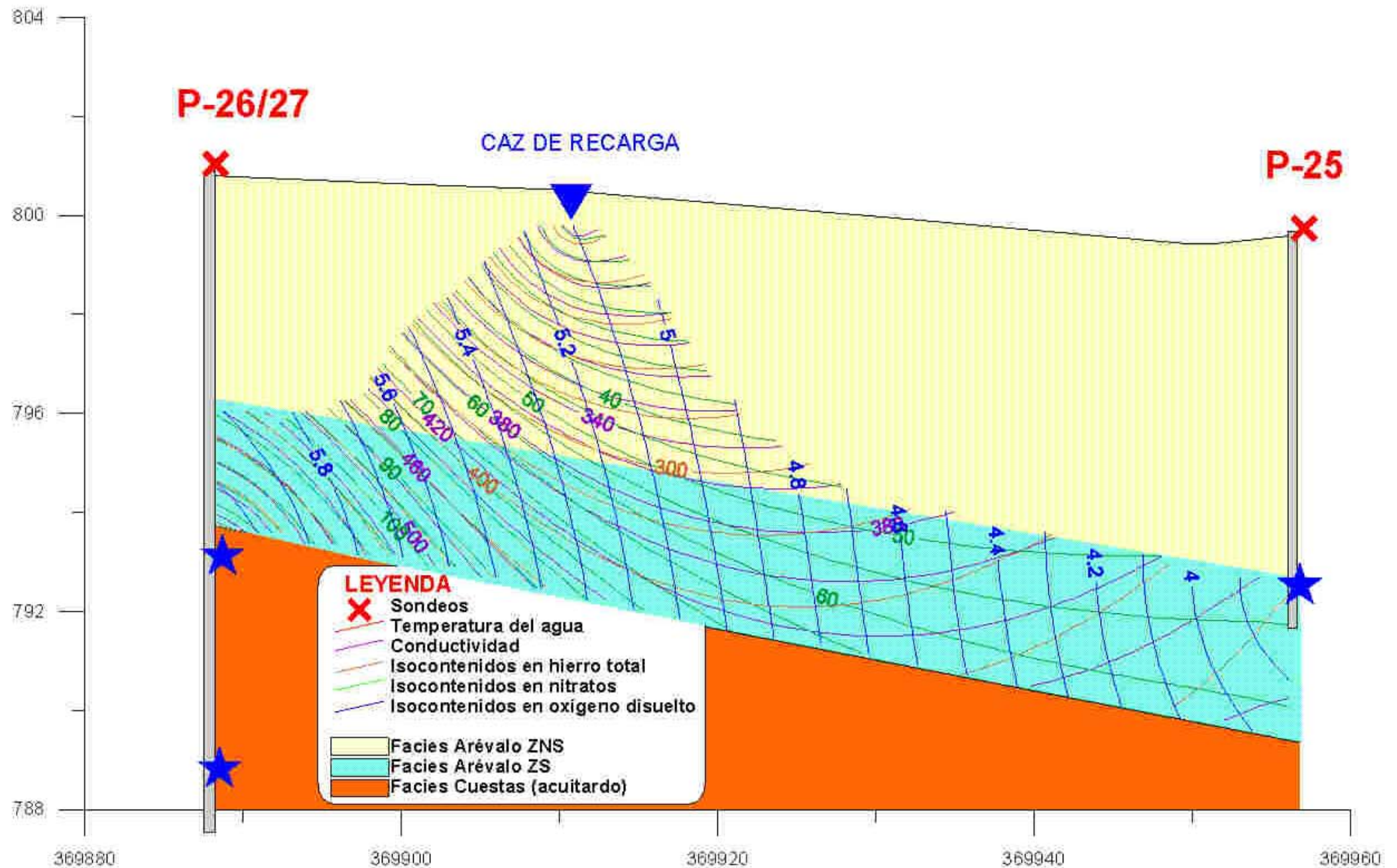
PERFIL HIDROQUÍMICO 13



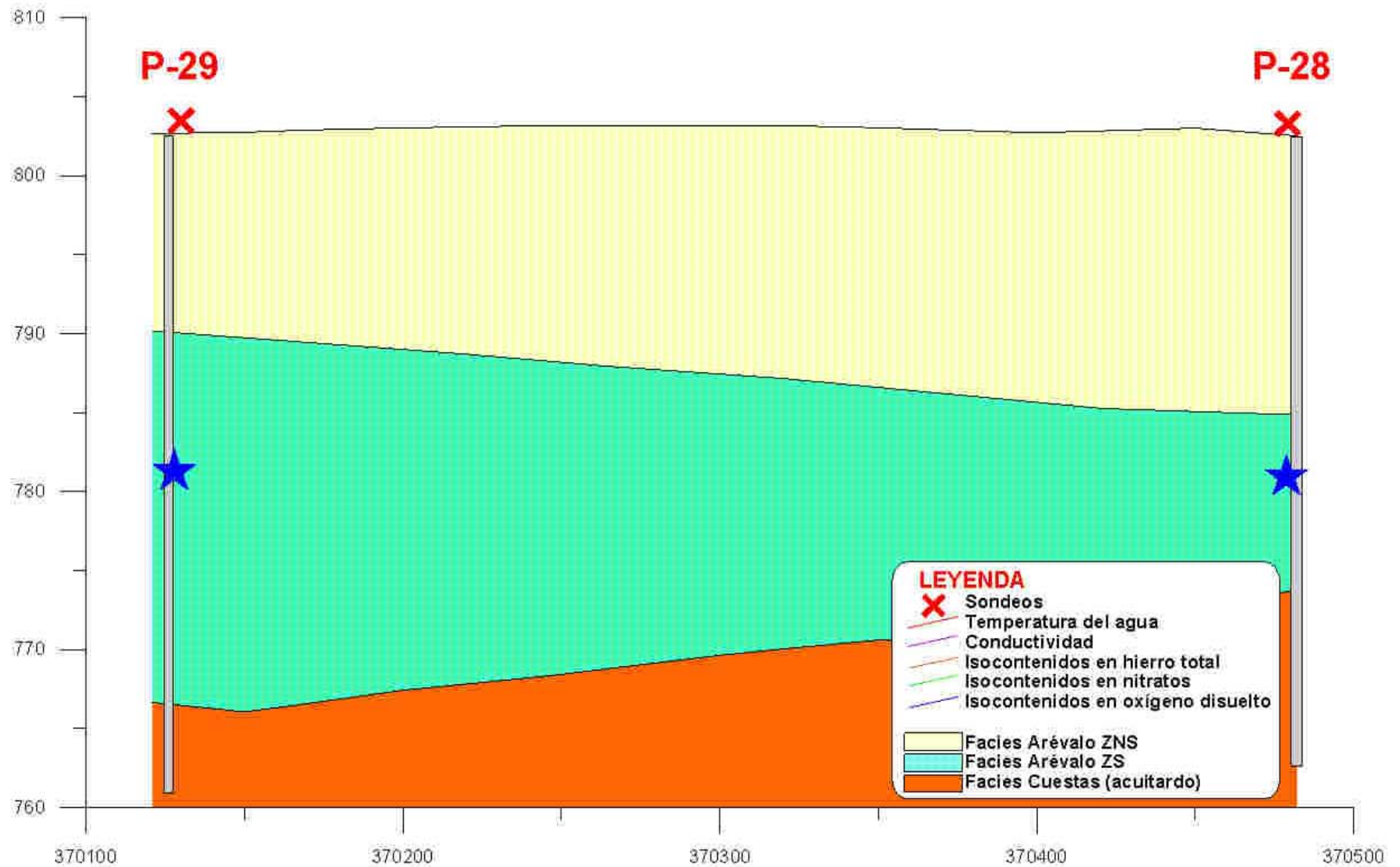
PERFIL HIDROQUÍMICO 14



PERFIL HIDROQUÍMICO 15



PERFIL HIDROQUÍMICO 16



BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3.2. SUELOS

3.2.1. LA TESTIFICACIÓN DETALLADA DE LOS TESTIGOS DE LAS PERFORACIONES

3.2.2. RESULTADOS ANALÍTICOS

3.2.3. ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS DE LAS MUESTRAS DE ARENA

3.2.3.1. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

3.2.4. ESTUDIO TEXTURAL. OBSERVACIÓN CON LUPA BINOCULAR

3.2.4.1. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

3.2.5. ESTUDIO TEXTURAL Y COMPOSICIONAL. OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO DE LUZ POLARIZADA

3.2.5.1. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA



- **SONDEO 20¹.**

De 0 a 0.3 m.- Terreno Vegetal constituido por arena arcillosa marrón oscura de grano fino, con indicios de grano medio y presencia de raíces.

De 0.3 a 0.9 m.- Arena con indicios de grava y gravilla cuarcítica marrón claro, de grano muy fino a medio.

De 0.9 a 1.8 m.- Arena limosa marrón grisáceo, de grano medio con motas negras de M.O. y de color pardo.

De 1.8 a 2.8 m.- Arena con indicios de arcilla marrón claro, de grano fino con lentes intercaladas de arena limosa.

A 2 m aparece una veta de arena limosa de 5 cm de espesor.

A 2.35 m aparece una veta de arena limosa de 5 cm de espesor.

A 2.4 m aumenta el tamaño de grano a medio/fino y aparece algo de grava y gravilla cuarcítica.

De 2.8 a 3.55m.- Arena con bastante limo marrón claro y grisáceo, de grano fino a medio.

De 3.55 a 4 m.- Arena con algo de grava e indicios de arcilla marrón anaranjado, de grano medio a grueso.

De 4 a 4.2 m.- Limo marrón verdoso con indicios de arena.

De 4.2 a 5.8 m.- Arena con indicios de arcilla marrón clara, de grano muy fino a fino.

A 5 m aumento del tamaño de grano a medio, e indicios de gravilla.

A 5.4 m disminución del tamaño de grano a muy fino.

A 5.6 m aumento del tamaño de grano a medio/grueso.

A 5.85 m aparecen lentes rojizas (>Fe)

De 5.85 a 10.2 m.- Arena con algo de grava y gravilla, de grano grueso marrón claro.

A 6.2 m aparece veta de arena limosa.

A 6.45 m aparece veta de arena limosa.

A 7.5 m aumento en el porcentaje de arcilla a algo.

A 9.7 m aparece veta limosa (5 cm) marrón anaranjado.

De 10.2 a 12.15 m.- Arena con algo de grava y gravilla cuarcítica anaranjada, de grano grueso.

A 10.9 m aparece veta de arena de grano fino con algo de arcilla.

A 11.6 m aparece veta de arena de grano fino con algo de arcilla.

De 12.15 a 12.9 m.- Arena con algo de arcilla gravilla y grava, de grano medio y grueso.

De 12.9 a 13.2 m.- Arena limosa con indicio de gravas, marrón de grano medio.

De 13.2 a 14.6 m.- Arcilla arenosa marrón.

A 14.20 m aparece una lente de carbonatos de contacto irregular.

De 14.6 a 15.3 m.- Arena arcillosa marrón claro y anaranjada de grano fino.

De 15.3 a 16 m.- Limo arenoso marrón, de grano fino con lentes de carbonatos con indicios a algo de grava.

De 16 a 17.3 m.- Arena con algo de arcilla, de grano fino marrón anaranjado.

A 17.1 m presencia de lentes de carbonato blancas.

De 17.3 a 18.2 m.- Arcilla arenosa marrón rojizo con indicios de arena muy fina.

De 18.2 a 18.6 m.- Arena con algo de arcilla marrón de grano fino.

¹ Numeración correspondiente al inventario de puntos de agua

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

De 18.6 a 20.1 m.- Arcilla con bastante arena marrón, de grano fino con lentes de carbonato blancas.

De 20.1 a 21 m.- Arena arcillosa marrón de grano fino.

De 21 a 22.8 m.- Arena con algo de arcilla, de grano fino a medio marrón anaranjado.

A 22.20 m.- aparece una veta de arcilla con algo de arena marrón muy firme (20cm).

A 22.50 m.- aparece veta de arcilla arenosa marrón (30 cm).

De 22.8 a 24 m.- Arena algo arcillosa marrón, de grano fino a medio

A 23.20 m.- veta de arcilla arenosa (20 cm)

De 24 a 26 m.- Arena algo arcillosa marrón anaranjada , de grano medio a fino.

A 24.9 m.- presencia de intercalaciones de lentes carbonatadas.

De 26 a 30.2 m.- Arena con algo de arcilla margosa marrón, con nódulos de carbonato en tonos blanquecinos blanco.

A 28.6 m.- estrato de arcilla arenosa marrón rojizo (60 cm).

- SONDEO 34.

De 0 a 0.8 m.- Arenas de grano muy fino, con bastante arcilla, marrón.

De 0.8 a 1.35 m.- Arcillas, con cemento de CO₃, marrón blanquecino.

De 1.35 a 1.8 m.- Gravas, arenosas con indicios de arcilla, marrón.

De 1.8 a 2.4 m.- Arena heterométrica, con bastante grava, marrón clara.

De 2.4 a 4.4 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 4.4 a 6 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla y grava, marrón blanquecino.

De 6 a 6.8 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 6.8 a 8 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón.

De 8 a 11.4 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 11.4 a 11.8 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón.

De 11.8 a 12 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón oscuro.

De 12 a 12.2 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón.

De 12.2 a 15.1 m.- Arcillas, con algo de arena, carbonosa, gris oscuro, abigarrada.

De 15.1 a 16.5 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 16.5 a 17 m.- Arenas de grano muy fino, arcillosas, marrón verdoso.

De 17 a 19 m.- Arcillas, arenosas, con nódulos de CO₃, marrón.

De 19 a 19.4 m.- Arcillas, arenosas, marrón.

De 19.4 a 19.8 m.- Arcillas, arenosas, con nódulos de CO₃, marrón.

De 19.8 a 21.7 m.- Arenas de grano fino, arcillosas, con nódulos de CO₃, marrón verdoso.

De 21.7 a 30.2 m.- Arenas de grano fino a medio, arcillosas, marrón verdoso.

De 30.2 a 33 m.- Arenas de grano fino, arcillosas, con cemento de CO₃, marrón verdoso.

De 33 a 33.8 m.- Arenas de grano fino, arcillosas, con cemento de CO₃, marrón rojizo.

De 33.8 a 35 m.- Arenas de grano fino a medio, arcillosas, marrón verdoso.

De 35 a 36.9 m.- Arcillas, con indicios de arcilla y nódulos de CO₃, marrón.

De 36.9 a 40 m.- Arenas de grano fino a medio, arcillosas, con nódulos de CO₃ ocasionales, marrón.

- SONDEO 57.

De 0 a 0.4 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón oscuro.

De 0.4 a 0.6 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón.

De 0.6 a 1.4 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla y cemento de CO₃, marrón claro.

De 1.4 a 1.8 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y cemento de CO₃, marrón.

De 1.8 a 2.3 m.- Arenas de grano fino a medio, con bastante arcilla y cemento de CO₃, marrón.

De 2.3 a 2.5 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla y cemento de CO₃, marrón.

De 2.5 a 3 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 3 a 3.6 m.-

De 3.6 a 3.8 m.- Arenas de grano fino, con algo-bastante arcilla, marrón.

De 3.8 a 4.6 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 4.6 a 6 m.- Arenas de grano fino, con algo-bastante arcilla, marrón.

De 6 a 6.8 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 6.8 a 7.1 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón claro.

De 7.1 a 7.25 m.- Arcillas, marrón oscura, carbonosa.

De 7.25 a 8 m.- Arcillas, marrón verdosa, abigarrada.

De 8 a 8.3 m.- Arcillas, con algo de arena, marrón verdosa, abigarrada.

De 8.3 a 8.6 m.- Arenas de grano fino, con algo-bastante arcilla, marrón verdoso.

De 8.6 a 9.3 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla, marrón.

De 9.3 a 9.6 m.- Arenas de grano fino a medio, marrón.

De 9.6 a 10.2 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de grava, marrón.

De 10.2 a 13 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 13 a 13.2 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón claro.

De 13.2 a 15.2 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla y cemento de CO₃, marrón claro.

De 15.2 a 17 m.- Arenas de grano fino, con bastante arcilla y cemento de CO₃, marrón rojizo.

De 17 a 17.3 m.- Arcillas, con indicios de arena y cemento de CO₃.

De 17.3 a 18 m.- Arenas de grano fino, arcillosas, marrones.

De 18 a 18.5 m.- Arenas de grano fino a medio, arcillosas, marrones.

De 18.5 a 19.6 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón rojizo.

De 19.6 a 21 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón claro.

- SONDEO 84.

De 0 a 0.1 m.- Terreno Vegetal constituido por arena con indicios de arcilla, marrón clara de grano fino e indicios raíces.

De 0.1 a 0.7 m.- Arena con indicios de arcilla, marrón clara de grano fino.

De 0.7 a 2 m.- Arena con indicios de arcilla y algo de grava marrón muy claro, de grano muy fino.

De 2 a 2.4 m.- Arena con bastante grava y gravilla marrón muy claro, de grano muy fino.

De 2.4 a 4.1 m.- Arena con indicios de grava y algo de arcilla marrón claro, de grano fino.

A 3.5 m.- aumenta la cantidad de arcilla a algo (20 cm)

A 3.9 m.- aumento en el porcentaje de arcilla a bastante. Color marrón.

De 4.1 a 4.4 m.- Arcilla con indicios de arena, marrón grisáceo. Limo endurecido, muy firme.

De 4.4 a 7.65 m.- Limos margosos gris verdoso con indicios de arena de grano fino (CO_3).

A 5.9 m.- veta de arena con indicios de arcilla, de grano fino a medio marrón claro. (CO_3)

A 6.05 m.- aumento en el porcentaje de arena a algo.

De 7.65 a 8.6 m.- Arena con bastante arcilla margosa marrón grisácea, de grano fino.

De 8.6 a 9.2 m.- Arena con indicio de arcilla marrón claro y anaranjado, de grano fino.

De 9.2 a 10 m.- Arena algo arcillosa (margosa) de grano fino a medio.

A 9.8 m.- Aumento en el porcentaje de arcilla margosa a bastante.

De 10 a 11.5 m.- Arcilla margosa con indicios de arena de grano fino a medio, marrón con tonos gris verdosos.

A 11 m.- Aumento en el porcentaje de arena a algo.

A 11.2 m.- Aumento en el porcentaje de arena a bastante.

De 11.5 a 11.9 m.- Arena con algo de arcilla marrón grisáceo, de grano fino.

De 11.9 a 13.75 m.- Arena con indicio de arcilla y gravilla marrón anaranjado, de grano fino.

A 13.25 m.- Veta de marga arenosa. (15 cm).

De 13.75 a 16.6 m.- Arena con indicio de grava, de grano medio a fino.

A 16.5 m.- Aumento en el porcentaje de arcilla a algo.

De 16.6 a 16.8 m.- Arena con algo de gravilla e indicios de arcilla anaranjada, de grano medio.

De 16.8 a 17.4 m.- Marga arenosa gris verdosa, de grano medio con motas de (CO_3).

A 17.3 m.- descenso en el porcentaje de arenas a algo.

De 17.4 a 17.7 m.- Arcillas abigarradas marrón rojizas y verdes con indicios de arena.

De 17.7 a 19.9 m.- Arcilla margosa con algo de arena, marrón y presencia de nódulos de (CO_3).

De 19.9 a 21 m.- Arena con algo de arcilla, marrón clara de grano muy fino.

- SONDEO 100.

- De 0 a 1 m.-** Arcillas, con algo de gravilla y raíces, marrón oscuro.
- De 1 a 2 m.-** Arcillas, con bastante arena, marrón oscuro.
- De 2 a 3 m.-** Arenas de grano fino, con indicios de arcilla y gravilla, marrón claro.
- De 3 a 4 m.-** Arena heterométrica, con indicios de grava y arcilla, marrón claro.
- De 4 a 5 m.-** Arenas de grano fino, con algo de arcilla y gravilla, marrón claro.
- De 5 a 6 m.-** Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón rojizo.
- De 6 a 7 m.-** Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón rojizo.
- De 7 a 8 m.-** Arenas de grano fino a medio, arcillosa con indicios de gravilla, marrón rojizo.
- De 8 a 9 m.-** Arenas de grano fino a medio, arcillosa con indicios de gravilla, marrón rojizo.
- De 9 a 12 m.-** Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla y gravilla, marrón claro.
- De 12 a 13 m.-** Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón.
- De 13 a 14 m.-** Arenas de grano fino, con indicios de arcilla y gravilla, marrón claro.
- De 14 a 15 m.-** Arenas de grano muy fino, con algo de arcilla, marrón claro.
- De 15 a 16 m.-** Margas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarrado.
- De 16 a 17 m.-** Margas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarrado.
- De 17 a 18 m.-** Margas, con algo de arena, marrón, abigarrado.
- De 18 a 19 m.-** Margas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarrado.
- De 19 a 20 m.-** Margas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarrado.
- De 20 a 21 m.-** Margas, con algo de arena, marrón, abigarrado.
- De 21 a 22 m.-** Margas, con algo de arena y grava, marrón oscuro.
- De 22 a 23 m.-** Margas.
- De 23 a 24 m.-** Margas, con algo de arena y grava, marrón abigarrado.
- De 24 a 25 m.-** Margas, con algo de arena y grava, marrón abigarrado.

- SONDEO 104.

De 0 a 0.15 m.- Terreno vegetal. Arena marrón de grano medio con algo de arcilla.

De 0.15 a 0.7 m.- Arena marrón de grano medio con indicios de arcilla y grava.

De 0.7 a 2.5 m.- Arena heterométrica marrón clara con indicios de arcilla y grava.

De 2.5 a 3.3 m.- Arena de grano fino a medio blanquecina con indicios de arcilla y grava.

De 3.3 a 4.6 m.- Arena de grano medio a grueso marrón claro y anaranjado con algo de grava e indicios de arcilla.

De 4.6 a 4.8 m.- Arena de grano medio marrón anaranjada con indicios de arcilla y grava (grava de posible naturaleza sienítica).

De 4.8 a 5.4 m.- Arena marrón grisácea de grano fino.

De 5.4 a 5.7 m.- Arena marrón blanquecina heterométrica con indicios de arcilla y grava.

De 5.7 a 6 m.- Arena muy fina, marrón grisácea con algo de arcilla.

De 6 a 9.15 m.- Arena marrón anaranjada de grano medio con indicios de arcilla y grava.

A 7.4 m.- aumento en el tamaño de grano a medio, y en el contenido de grava a algo.

De 9.15 a 10.5 m.- Arena marrón anaranjada de grano medio con indicios de arcilla y grava.

A 9.15 m.- veta de limo marrón (30 cm).

De 10.5 a 11.1 m.- Arcilla marrón con bastante arena.

De 11.1 a 12.6 m.- Arcilla marrón verdosa con indicios de arena.

A 12 m.- aumento en el contenido de arcilla a algo.

De 12.6 a 13.2 m.- Arena marrón de grano fino a medio.

De 13.2 a 14.4 m.- Arena marrón claro de grano medio con indicios de arcilla y grava.

A 14.1 m.- aumento en el contenido de arcilla y grava a algo.

De 14.4 a 15.3 m.- Grava arenosa marrón claro.

A 14.8 m.- veta de arcilla arenosa (10 cm)

De 15.3 a 15.65 m.- Grava con bastante arena de grano grueso.

De 15.65 a 18.8 m.- Marga marrón verdoso.

A 16.8 m.- color marrón con nódulos de CO₃. términos menos margosos.

De 18.8 a 20.2 m.- Arcilla marrón no margosa.

- SONDEO 118.

De 0 a 0.1 m.- Terreno vegetal. Arena marrón clara de grano muy fino con indicios de arcilla y grava.

De 0.1 a 0.5 m.- Arena marrón claro de grano medio con indicios de arcilla y grava.

De 0.5 a 1.3 m.- Arena marrón grano fino a medio.

De 1.3 a 2.5 m.- Arena marrón claro de grano medio con indicios de arcilla y grava.

De 2.5 a 4.3 m.- Arcilla arenosa marrón.

De 4.3 a 6.4 m.- Arena de grano fino marrón claro con indicios de arcilla y grava.

De 6.4 a 7 m.- Arena marrón anaranjado de grano medio a grueso.

De 7 a 8.8 m.- Arena de grano fino marrón claro con indicios de arcilla y grava.

De 8.8 a 9 m.- Arena heterométrica con predominio de grano fino y medio marrón verdoso con indicios de arcilla.

De 9 a 9.5 m.- Arena arcillosa, marrón verdosa de grano muy fino (no marga).

De 9.5 a 10.7 m.- Arcilla margosa marrón verdosa con indicios de arena.

De 10.7 a 13.6 m.- Arcilla margosa marrón verdosa con indicios de arena.

A 11.15 m.- aumento en el contenido de arena a algo.

A 12.25 m.- veta de limo marrón con bastante arena (25 cm).

De 13.6 a 14.9 m.- Arena de grano fino marrón claro con indicios de arcilla.

De 14.9 a 15.9 m.- Arena marrón anaranjado heterométrica con bastante grava.

De 15.9 a 20 m.- Arcilla margosa marrón con indicios de arena y nódulos de CO₃.

- SONDEO 121.

De 0 a 0.6 m.- Arenas de grano fino, con presencia de raíces, marrón oscuro

De 0.6 a 0.9 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 0.9 a 2 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón.

De 2 a 3 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y gravilla, marrón claro.

De 3 a 4.5 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla y algo de grava, marrón claro.

De 4.5 a 5 m.- Arcillas, con indicios de arenas, marrón oscuro.

De 5 a 6 m.- Margas, marrón.

De 6 a 6.6 m.-

De 6.6 a 7.4 m.- Margas, marrón.

De 7.4 a 7.6 m.- Arcillas, marrón rojizo, abigarrada.

De 7.6 a 9 m.- Margas, marrón.

De 9 a 12 m.- Margas, marrón rojizo, abigarrada.

- SONDEO 122.

De 0 a 0.2 m.- Gravas, con indicios de arcillas y arenas de grano fino.

De 0.2 a 2.2 m.- Arcillas, con algo-bastante arena y cemento de CO₃, marrón claro.

De 2.2 a 3.15 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 3.15 a 3.9 m.- Arenas de grano muy fino, con indicios de arcilla y gravilla, marrón claro.

De 3.9 a 4 m.- Arenas de grano fino, arenosa, marrón claro.

De 4 a 4.7 m.- Arenas de grano fino a medio, marrón claro.

De 4.7 a 5.4 m.- Arenas de grano fino, marrón claro.

De 5.4 a 6 m.-

De 6 a 6.7 m.- Arenas de grano fino, marrón claro.

De 6.7 a 6.8 m.- Arenas de grano medio, con bastante arcilla.

De 6.8 a 7.3 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 7.3 a 7.5 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla, marrón oscuro.

De 7.5 a 7.8 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 7.8 a 8.4 m.- Arenas de grano medio, marrón.

De 8.4 a 8.6 m.- Arenas de grano muy fino, marrón claro.

De 8.6 a 9 m.- Arenas de grano fino, marrón claro.

De 9 a 9.6 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón.

De 9.6 a 10.2 m.-

De 10.2 a 10.5 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón.

De 10.5 a 11.4 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 11.4 a 11.9 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 11.9 a 12 m.- Arenas de grano medio, con algo de arcilla e indicios de grava, marrón claro.

De 12 a 12.6 m.- Margas, con indicios de arena, marrón verdoso.

De 12.6 a 15 m.- Margas, con indicios de arena, marrón.

- SONDEO 135.

- De 0 a 1 m.-** Arena heterométrica, con indicios de arcilla, marrón claro.
De 1 a 2 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla, marrón claro.
De 2 a 3 m.- Arcillas, con algo de arena, anaranjada.
De 3 a 4 m.- Arcillas, con indicios de arena y gravilla, marrón.
De 4 a 5 m.- Arcillas, con algo de gravilla, gris verdoso.
De 5 a 6 m.- Margas, con nódulos de CO₃, gris verdoso.
De 6 a 7 m.- Margas, con nódulos de CO₃ y óxidos de hierro, gris verdoso.
De 7 a 8 m.- Margas, gris verdoso.
De 8 a 9 m.- Margas, con indicios de arena gris verdoso.
De 9 a 10 m.- Margas, con nódulos de CO₃, gris abigarrado.
De 10 a 11 m.- Margas, con nódulos de CO₃ y óxidos de hierro, gris verdoso.
De 11 a 12 m.- Margas, gris verdoso, abigarrado.
De 12 a 13 m.- Margas, marrón anaranjado y verdoso, abigarrado.
De 13 a 14 m.- Margas arcillosas, con indicios de arena, marrón claro.
De 14 a 15 m.- Margas, gris anaranjado y verdoso, abigarrado.
De 15 a 16 m.- Margas, con indicios de arena y nódulos de carbonato, marrón claro.
De 16 a 17 m.- Margas, con indicios de arena y nódulos de carbonato, marrón grisáceo.
De 17 a 19 m.- Margas arcillosas, con indicios de arena y óxidos, marrón.
De 19 a 23 m.- Margas arcillosas, con indicios de arena y óxidos, marrón.
De 23 a 25 m.- Margas arcillosas, con indicios de arena, marrón.

- SONDEO 155.

De 0 a 1 m.- Arenas de grano muy fino a fino, presencia de materia orgánica, marrón.

De 1 a 2 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla, marrón.

De 2 a 3 m.- Arenas de grano muy fino a fino, con indicios-algo de arcilla, marrón.

De 3 a 4 m.- Arenas de grano fino, con algo-bastante arcilla, marrón.

De 4 a 5 m.- Margas, gris.

De 5 a 6 m.- Margas, con indicios de gravilla, con cemento ferruginoso, gris verdoso y marrón rojizo.

De 6 a 7 m.- Margas, con algo de gravilla, con cemento ferruginoso, gris verdoso y marrón rojizo.

De 7 a 8 m.- Margas arcillosas, marrón.

De 8 a 9 m.- Margas, gris.

De 9 a 10 m.- Margas, gris verdoso.

De 10 a 11 m.- Margas, gris.

De 11 a 12 m.- Margas, gris.

- SONDEO 158.

De 0 a 0.4 m.- Arenas de grano muy fino a fino, con bastante arcilla, marrón.

De 0.4 a 0.6 m.- Arenas de grano fino, arcillosas, marrón oscuro.

De 0.6 a 1.8 m.- Arenas de grano muy fino, con bastante arcilla y cemento de CO₃, marrón verdoso

De 1.8 a 2.4 m.-

De 2.4 a 3 m.- Arena heterométrica, con indicios de gravas, marrón claro.

De 3 a 5 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcillas y gravas, marrón claro.

De 5 a 5.2 m.- Arcillas, Arenosa, marrón claro.

De 5.2 a 6.9 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcillas y gravas, marrón claro.

De 6.9 a 7.3 m.- Arenas de grano fino a medio, marrón.

De 7.3 a 8.3 m.- Arena heterométrica, con indicios-algo de gravas.

De 8.3 a 8.5 m.- Arenas de grano medio, arcillosa, marrón.

De 8.5 a 9 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcillas y gravas, marrón claro.

De 9 a 9.25 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón.

De 9.25 a 9.6 m.- Arenas de grano fino, marrón claro.

De 9.6 a 10.2 m.-

De 10.2 a 10.5 m.- Arenas de grano fino a medio, alto contenido en hierro, marrón rojizo.

De 10.5 a 10.8 m.- Arenas de grano muy fino, algo de arcilla, marrón claro.

De 10.8 a 11.5 m.- Arenas de grano muy fino, con indicios de arcilla, marrón claro.

De 11.5 a 13.6 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y algo de grava cuarcítica, marrón claro.

De 13.6 a 14.7 m.- Arenas de grano fino, marrón claro.

De 14.7 a 15.25 m.- Arenas de grano medio, con indicios de grava y arcilla, marrón.

De 15.25 a 16 m.- Margas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarradas.

De 16 a 18 m.- Margas, con indicios de arena, marrón, abigarradas.

De 18 a 21 m.- Margas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarradas.

- SONDEO 166.

- De 0 a 0.3 m.-** Arenas de grano fino, con indicios de arcillas, marrón oscuro.
De 0.3 a 3.3 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcillas, marrón claro.
De 3.3 a 3.6 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcillas, marrón blanquecino.
De 3.6 a 4.2 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de arcillas y algo de grava, marrón blanquecino.
De 4.2 a 5.5 m.- Arcillas, margosas, marrón verdoso.
De 5.5 a 6 m.- Arcillas, marrón verdoso.
De 6 a 6.7 m.- Arenas de grano muy fino, margosas, marrón verdoso.
De 6.7 a 7.6 m.- Arenas de grano fino, marrón blanquecino.
De 7.6 a 7.8 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón.
De 7.8 a 8.4 m.-
De 7.8 a 9 m.- Arenas de grano fino, con algo de arcilla, marrón.
De 9 a 10.2 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de grava y algo de arcillas, marrón blanquecino.
De 10.2 a 10.35 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcillas, marrón.
De 10.35 a 13.5 m.- Margas, marrón verdoso, abigarradas.
De 13.5 a 14.6 m.- Margas, marrón rojizo.
De 14.6 a 18 m.- Margas, marrón verdoso.

- SONDEO 167.

- De 0 a 1 m.-** Arena heterométrica, con indicios de arcilla, marrón claro.
De 1 a 2 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón claro.
De 2 a 3 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón claro.
De 3 a 4 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón claro.
De 4 a 5 m.- Arenas de grano fino, arcillosa, marrón.
De 5 a 6 m.- Arenas de grano muy fino, arcillosa, marrón.
De 6 a 7 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla, marrón.
De 7 a 8 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla, marrón.
De 8 a 9 m.- Arenas de grano medio, con algo de arcilla, marrón claro.
De 9 a 10 m.- Arenas de grano medio, con algo de arcilla, marrón claro.
De 10 a 11 m.- Arena heterométrica, con algo de arcilla, marrón claro.
De 11 a 12 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla, marrón claro.
De 12 a 13 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla, marrón claro.
De 13 a 15 m.- Arena heterométrica marrón con algo de arcilla.
De 15 a 18,6 m.- Margas, grises y rojizas y abigarradas.

- SONDEO 181.

De 0 a 0.5 m.- Terreno vegetal, arena con indicios de arcilla, marrón oscura de grano fino.

De 0.5 a 2.6 m.- Arena con indicios de arcilla, marrón clara de grano fino a medio.

A 1.2 m.- grano medio (10 cm)

A 1.8 m.- grano medio (20 cm)

A 2.4 m.- grano medio (20 cm)

De 2.6 a 3.25 m.- Arena con indicios de arcilla marrón claro, de grano fino a medio.

De 3.25 a 4.3 m.- Arena con indicios de arcilla y algo de grava marrón claro, de grano medio.

A 3.8 m.- color marrón.

De 4.3 a 7.3 m.- Arena con indicios de arcilla y gravilla, marrón anaranjado, de grano fino a medio.

A 5.4 m.- marrón claro.

A 5.6 m.- marrón.

A 6 m.- aumento en el porcentaje de arcilla a algo.

A 6.6 m.- color marrón claro.

De 7.3 a 8.3 m.- Arena algo arcillosa marrón claro, de grano muy fino.

De 8.3 a 10.8 m.- Arena con bastante grava e indicios de arcilla marrón, de grano medio a grueso.

A 9.6 m.- descenso en el tamaño de grano a fino.

A 9.9 m.- veta de arcillas abigarradas (20 cm.)

A 10.2 m.- aumento en el porcentaje de arcilla a algo.

De 10.8 a 11.1 m.- Arcillas abigarradas marrón verdoso y rojizas.

De 11.1 a 21 m.- Arcilla margosa abigarrada con indicios de arena.

A 11.2 m.- veta de arcilla limosa (20 cm).

A 13.2 m.- veta de arcillas abigarradas (20 cm.) marrón anaranjado

A 16.2 m.- marrón verdoso.

A 18.5 m.- marrón anaranjado.

- SONDEO 184.

- De 0 a 1 m.-** Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón claro.
De 1 a 2 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla, marrón claro.
De 2 a 3 m.- Arenas de grano fino, con algo-bastante de arcilla, marrón grisáceo.
De 3 a 4 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón grisáceo.
De 4 a 5 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcilla, marrón grisáceo.
De 5 a 6 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios-algo de arcilla, marrón grisáceo.
De 6 a 7 m.- Margas, con indicios de arena gris-abigarrado.
De 7 a 8 m.- Margas, con indicios de arena y gravilla gris-abigarrado.
De 8 a 9 m.- Margas, con indicios de arena gris-abigarrado.
De 9 a 10 m.- Margas, arcillosa con indicios de arena y gravilla, gris.
De 10 a 11 m.- Margas, con nódulos de carbonato, gris abigarrado.
De 11 a 12 m.- Margas, gris claro, abigarrado.

- SONDEO 204.

- De 0 a 0.5 m.-** Terreno vegetal, arena algo arcillosa, marrón oscura con indios de raíces, de grano fino a medio.
De 0.5 a 0.9 m.- Arena algo arcillosa, marrón, de grano fino a medio.
De 0.9 a 2.4 m.- Arena con indicios de arcilla y bastante grava marrón claro, de grano medio.
De 2.4 a 2.5 m.- Arena con algo de arcilla y bastante grava marrón claro, de grano medio.
De 2.5 a 2.7 m.- Arcilla limosa abigarrada.
De 2.7 a 4.2 m.- Arcilla margosa abigarrada con tono verdoso.
De 4.2 a 8 m.- Arcilla limosa abigarrada con nódulos de CO_3 marrón grisáceos.
De 8 a 8.6 m.- Arcillas margosas abigarradas con nódulos de CO_3 .
De 8.6 a 9 m.- Arcillas abigarradas con nódulos de CO_3 .
De 9 a 11.8 m.- Arcillas margosas abigarradas con nódulos de CO_3 . los últimos 20 cm no son margosos.

- **SONDEO 245.**

De 0 a 0.3 m.- Terreno vegetal. Arena marrón de grano fino con bastante arcilla.

De 0.3 a 1 m.- Arena marrón de grano fino con bastante arcilla.

De 1 a 3.6 m.- Arena blanquecina de grano muy fino con indicios de arcilla y grava.

A 1.6 m.- aumento en el contenido de grava a algo.

De 3.6 a 16.7 m.- Arena marrón anaranjado de grano medio con indicios de arcilla y grava.

A 5.4 m.- disminución en el tamaño de grano a fino.

A 6.4 m.- cambio de color a marrón claro.

A 6.6 m.- aumento en el contenido de arcilla a algo.

A 7.2 m.- descenso en el contenido de arcilla a indicios (color marrón blanquecino).

A 9.0 m.- aumento en el tamaño de grano a medio (color marrón anaranjado).

A 12 m.- aumento en el tamaño de grano a grueso (color marrón claro).

A 12.5 m.- aumento en el contenido de grava a algo.

A 13.6 m.- veta de arena arcillosa marrón oscuro (20 cm).

A 13.8 m.- aumento en el contenido de grava a bastante.

A 14.5 m.- descenso en el contenido de grava a algo.

A 16 m.- veta arenosa con bastante arcilla (20 cm).

A 16.4 m.- veta arena arcillosa con bastante grava.

De 16.7 a 19.2 m.- Arcilla marrón con indicios de arena.

De 19.2 a 21 m.- Arcilla margosa marrón claro con nódulos de CO₃.

A 19.8 m.- aumento en el contenido de arena a algo.

- SONDEO 261.

De 0 a 0.7 m.- Arenas de grano fino, arcillosas, marrón.

De 0.7 a 1 m.- Arcillas, arenosas, marrón blanquecino.

De 1 a 1.35 m.- Arenas de grano medio a grueso, con algo de arcillas, marrón blanquecino.

De 1.35 a 1.9 m.- Arcillas, arenosas, marrón blanquecino.

De 1.9 a 2.75 m.- Arenas de grano fino a medio, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 2.75 a 3.45 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 3.45 a 3.55 m.- Arenas de grano medio a grueso, con bastante arcilla e indicios de grava, marrón claro.

De 3.55 a 3.7 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón.

De 3.7 a 3.85 m.- Arenas de grano fino, con bastante arcilla, marrón claro.

De 3.85 a 4.05 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón verdoso, abigarradas.

De 4.05 a 4.25 m.- Arenas de grano muy fino, arcillosas, marrón verdoso.

De 4.25 a 4.4 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón verdoso.

De 4.4 a 4.5 m.- Arenas de grano muy fino, con bastante arcilla, marrón verdoso.

De 4.5 a 5.1 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón verdoso.

De 5.1 a 5.8 m.- Arcillas, con bastante arena, marrón verdoso.

De 5.8 a 7.25 m.- Arcillas, con indicios de arena, marrón.

De 7.25 a 7.7 m.- Arcillas, arenosas, marrón blanquecino.

De 7.7 a 8.4 m.- Arenas de grano medio a grueso, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 8.4 a 9 m.- Arenas de grano medio

De 9 a 10.6 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla y gravilla, marrón claro.

De 10.6 a 11.2 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 11.2 a 11.4 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla y grava, marrón claro.

De 11.4 a 11.7 m.- Arenas de grano muy fino, con algo de arcilla, marrón blanquecina.

De 11.7 a 12.9 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla y algo de grava, marrón claro.

De 12.9 a 13.1 m.- Arenas de grano fino, con indicios de arcilla y algo de grava, marrón claro.

De 13.1 a 13.9 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla y algo de grava, marrón claro.

De 13.9 a 14.3 m.- Arenas de grano fino a medio, con algo de arcillas e indicios de grava cuarcítica, marrón.

De 14.3 a 14.8 m.- Arenas de grano medio, con indicios de arcilla y algo-bastante grava, marrón claro.

De 14.8 a 15 m.- Arenas de grano medio, arcillosas, marrón abigarrado.

De 15 a 15.6 m.- Arena heterométrica, con indicios de arcilla y algo de grava, marrón claro.

De 15.6 a 15.7 m.- Arena heterométrica, con algo de arcilla y grava, marrón claro.

De 15.7 a 18.3 m.- Arcillas, con nódulos de CO₃, marrón verdoso.

De 18.3 a 21 m.- Margas, marrón verdoso.

- SONDEO 303.

De 0 a 1.9 m.- Arena con indicios de arcilla, marrón claro de grano fino.

De 1.9 a 10.8 m.- Arena algo arcillosa, marrón grisácea de grano fino a medio.

A 3.2 m.- aumento en el porcentaje de arcilla a bastante, grano fino y color marrón anaranjado.

A 3.8 m.- disminución en el porcentaje de arcilla a algo, color marrón grisáceo.

A 6.6 m.- color marrón anaranjado y grano fino.

De 10.8 a 11.2 m.- Arena con algo de arcilla marrón claro, de grano muy fino.

De 11.2 a 13.4 m.- Arena margosa marrón grisáceo, de grano muy fino, con nódulos de CO₃.

De 13.4 a 13.8 m.- Arena con algo de grava, marrón claro, de grano fino

De 13.8 a 14.15 m.- Arena limosa marrón verdoso, de grano fino.

De 14.15 a 14.8 m.- Arena con bastante grava y gravilla e indicios de arcilla marrón heterométrica.

A 14.4 m.- marrón claro.

De 14.8 a 16 m.- Grava arenosa marrón clara.

De 16 a 16.5 m.- Arena marrón clara con bastante grava de grano medio a grueso.

De 16.5 a 17.1 m.- Arena limosa marrón clara, de grano muy fino.

De 17.1 a 19.7 m.- Arena arcillosa/margosa marrón clara, de grano muy fino.

A 18.7 m.- veta de arcilla no margosa (20 cm).

De 19.7 a 27.6 m.- Arena arcillosa marrón clara de grano muy fino.

De 27.6 a 28.2 m.- Arena arcillosa marrón clara de grano fino.

De 28.2 a 28.8 m.- Arena con algo de arcilla marrón clara, de grano fino.

De 28.8 a 29.4 m.- Arena con indicios de arcilla marrón clara, de grano fino y medio.

ANÁLISIS GEOQUÍMICOS DE LA FRACCIÓN SÓLIDA**LOCALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE SUELOS EN LA CUBETA DE SANTIUSTE**

N	1	2	3	4	5	6
NOMBRE	<i>Facies Cuestas Coca</i>	<i>Paraje cañadilla</i>	<i>Laguna de la Iglesia</i>	<i>Laguna Caballo Alba</i>	<i>Arena Dunar</i>	<i>Sanchón</i>
X	371615	367939	368550	365500	370061	369695
Y	4563282	4569405	4562780	4567250	4562904	4560322
Z	769,7	768,0	786,7		786,0	792,0
fecha	6/28/02	6/28/02	6/28/02	6/28/02	6/28/02	6/28/02
C (mmhos/cm)	0,60	0,70	1,50	2,10	0,40	0,50
pH	7,8	8,1	9	9,5	7,2	8,6
HCO₃ (mg/l)	194	181	259	285	155	194
Cl (mg/l)	62	98	204	373	53	44
SO₄ (mg/l)	45	39	168	188	41	162
N t %	0,021	0,022	0,105	0,053	0,070	0,015
P (ppm)	8	24	20	21	4	4
MOO %	0,12	0,18	1,12	0,54	0,01	0,10
Na (meq/100g)	0,384	0,03	7.984	21.956	0,02	0,175
K (meq/100g)	1.841	0,205	3.325	3.325	0,102	0,307
Ca (meq /100g)	29.411	2.757	11.407	2.952	4.708	4.496
Mg (meq/100g)	12.467	0,673	15.929	10.345	0,276	1.704
arena %	11,85	92,78	4,95	14,55	94,81	90,53
limo %	33,8	3,72	27,25	17,15	1,94	2,87
arcilla %	54,35	3,5	67,8	68,3	3,25	6,6
CL	ac	ar	ac	ac	ar	ar

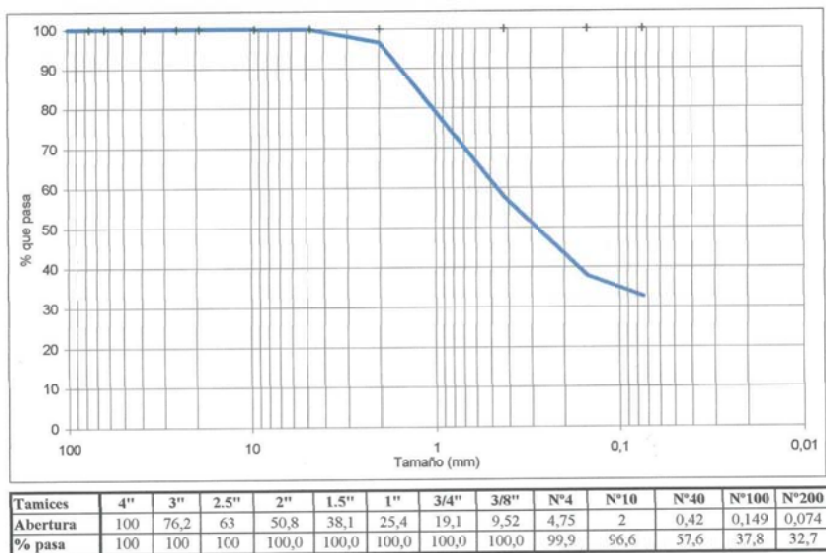
Método
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Volumétrico
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Espectofotométrico
Espectofotométrico
Espectofotométrico
Espectofotométrico
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975
Orden 5/12/1975

ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS EN LA CUBETA DE SANTIUSTE

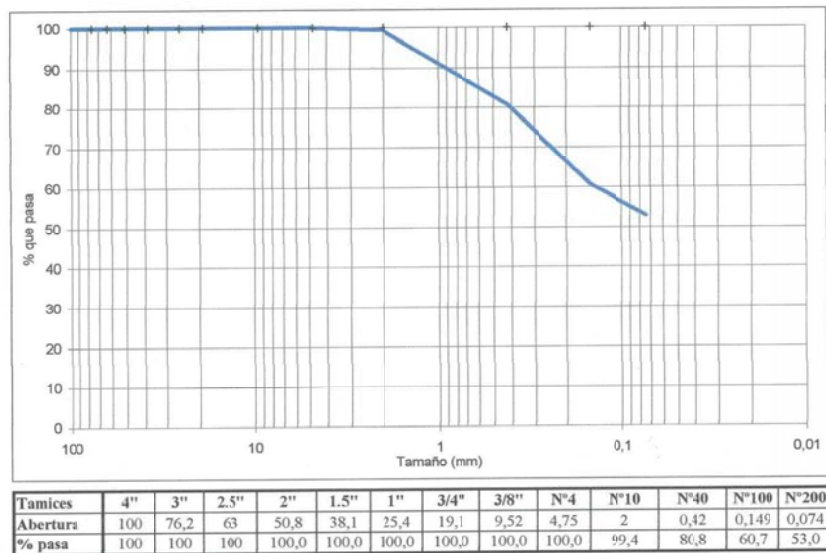
Tamiz ASTM									3	2	1,5	1	3/4	3/8	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 40	Nº 100
nº	Sondeo	Prof. (m)	X	Y	Z	% GRAVA	% ARENA	% FINOS	76,2	50,8	38,1	25,4	19,1	9,52	4,75	2	1,19	0,42	0,149
1	20	9,9	367419	4570177	763	23,2	67,8	9	100	100	100	100	100	97,2	93,5	76,8	57,3	23,2	11,8
2	57	2,5	368686	4567906	771,1	0,6	46,4	53	100	100	100	100	100	100	100	99,4		80,8	60,7
3	84	13,8	369306	4566315	778,7	14,5	75,5	10	100	100	100	100	100	99	96,4	85,5	70,1	27,2	13
4	104	13,7	369787	4565325	780,9	14,2	75,7	10,1	100	100	100	100	100	98,9	96	85,8	69,5	26,7	13,2
5	122	6,5	368958	4564189	782	1,1	87,5	11,4	100	100	100	100	100	100	99,6	98,9		64,4	22,3
6	118	8,1	370037	4564627	779,4	15,4	66,5	18,1	100	100	100	100	100	98,7	96,4	84,6	68,7	38	23
7	118	14,45	370037	4564627	779,4	8,1	83,1	8,8	100	100	100	100	100	100	98,1	91,9	74,5	39,3	12,7
8	158	3,5	369337	4562450	786,6	2,2	95,3	2,5	100	100	100	100	100	100	99,8	97,8		18,7	3,1
9	245	12,1	369475	4559082	798,3	2,8	88,9	8,3	100	100	100	100	100	100	99,2	97,2	86,8	60,4	11,3
10	204	2,4	369662	4560253	790,8	16,8	69,1	14,1	100	100	100	100	96,9	96,9	94,8	83,2	65,6	26,8	16,7
11	303	14,5	370474	4556999	803,8	22,8	64,3	12,9	100	100	100	100	94,1	86	82,8	77,2	61,3	29,4	16,5
12	181	7,2	370648	4560956	791,9	1,7	78,8	19,5	100	100	100	100	100	100	100	98,4		59,2	42,4
13	34	12,45	367529	4569305	766,2	3,4	63,9	32,7	100	100	100	100	100	100	99,9	96,6		57,6	37,8
14	261	8,7	369979	4558559	798,3	19	76,7	4,3	100	100	100	100	100	100	98,4	81		17,7	6,1
15	121	4,9	371224	4564445	782,2	0	0,7	99,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,8	99,6
16	166	7,45	370689	4561876	789,1	0	27,8	72,2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94,3	80,8
17	166	8,1	370689	4561876	789,1	8,3	86,4	5,3	100	100	100	100	100	100	99,3	91,7		31,5	8,6
18	166	17,7	370689	4561876	789,1	0	1,1	98,8	100	100	100	100	100	100	100	100		99,5	99,4
19	100	3,05	368629	4565382	777,1	20,9	63,9	15,2	100	100	100	100	100	96,1	92,1	79,1		31,4	18,4

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA). ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

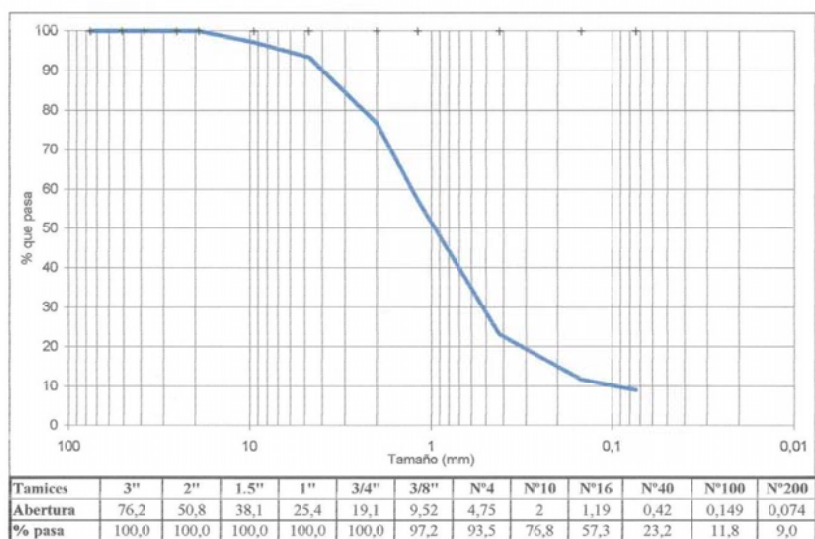
Nº 200
0,074
9
53
10
10,1
11,4
18,1
8,8
2,5
8,3
14,1
12,9
23,6
32,7
4,3
99,3
72,2
5,3
98,9
15,2



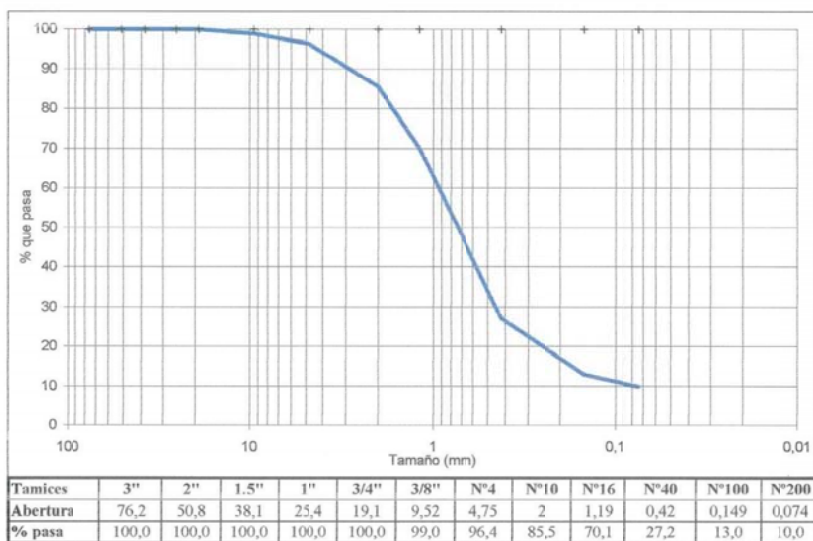
034- 12,40 m.jpg



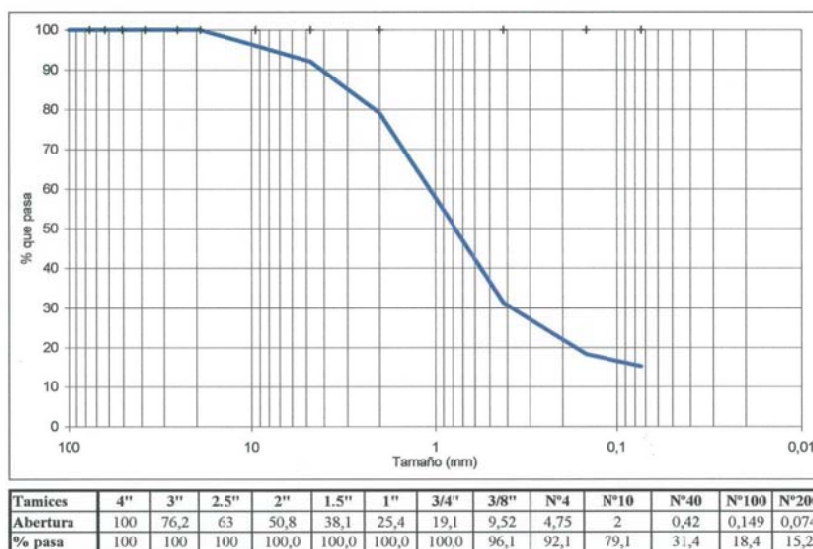
057- 2,40 m.jpg



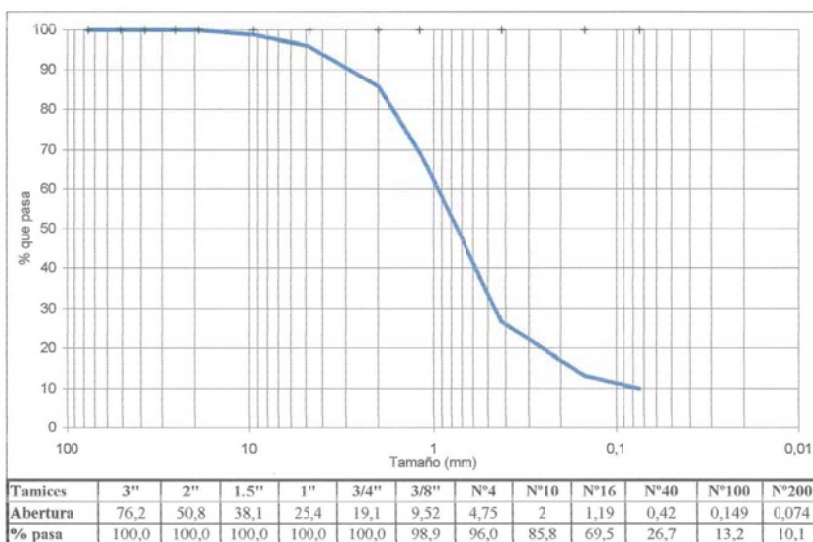
057- 9,9 m.jpg



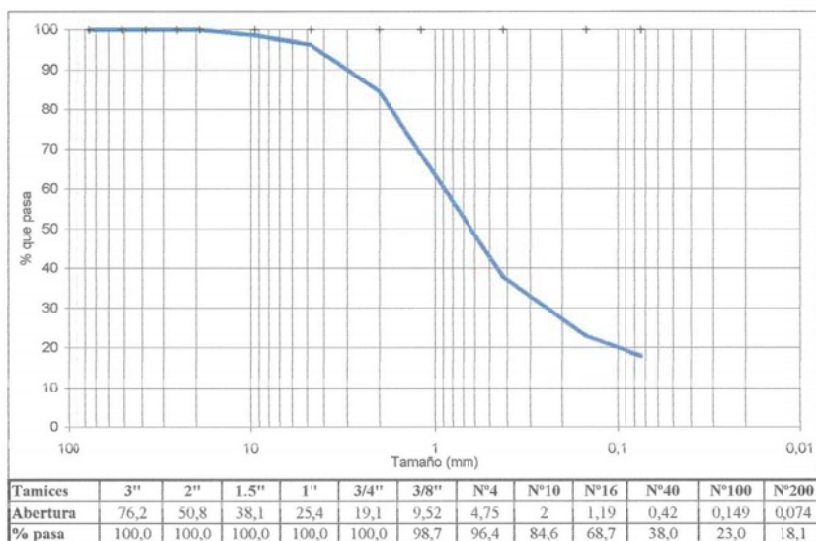
084- 13,8 m.jpg



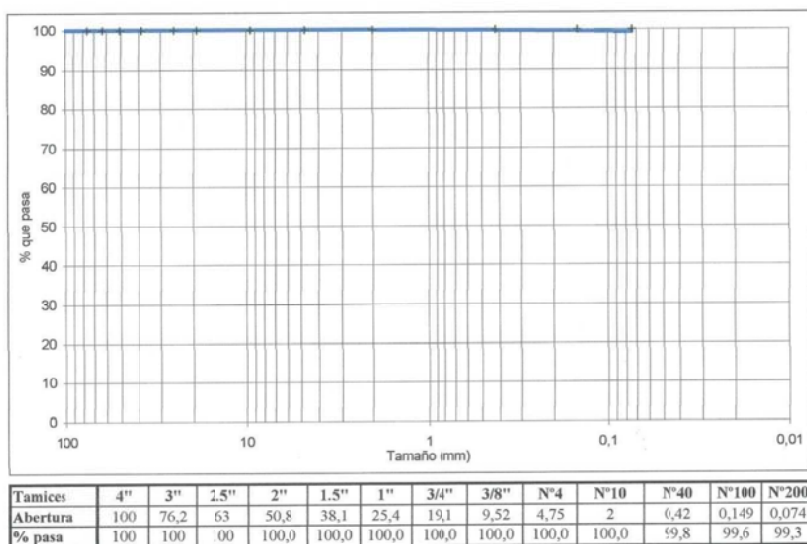
100- 3,00 m.jpg



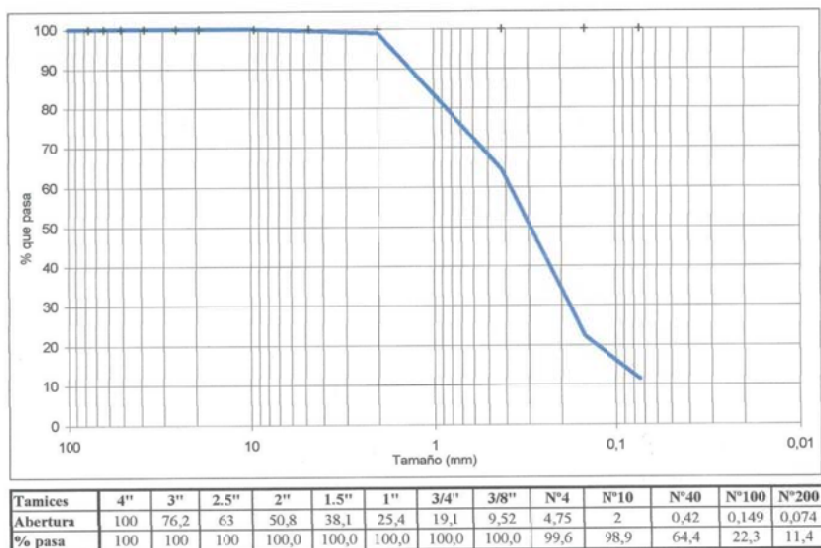
104- 13,7 m.jpg



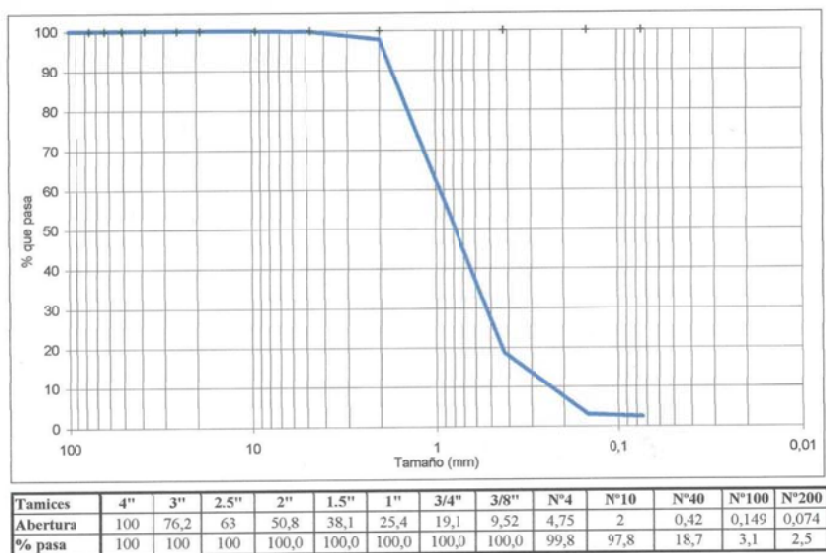
118- 8,1 m.jpg



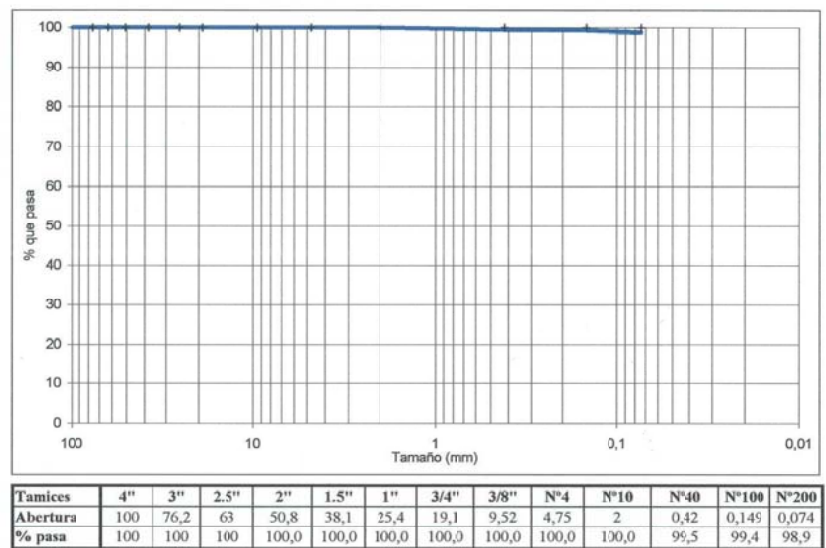
121- 4,80 m.jpg



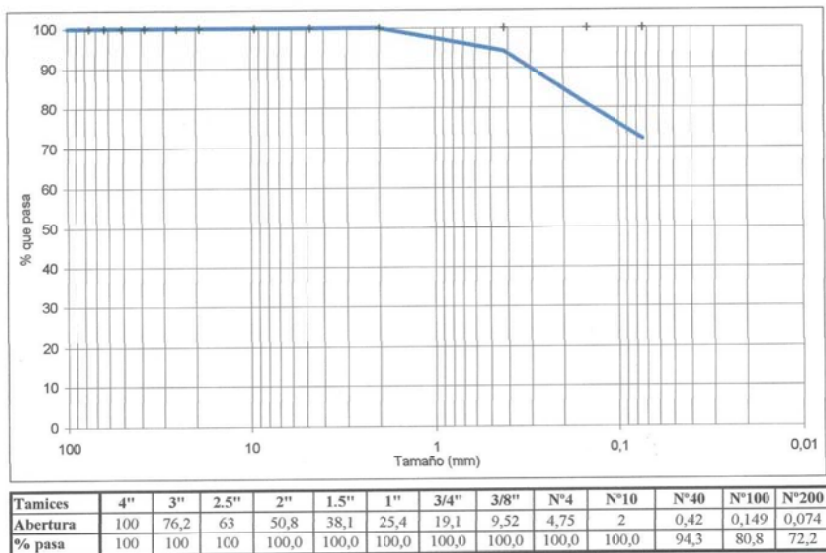
122- 6,40 m.jpg



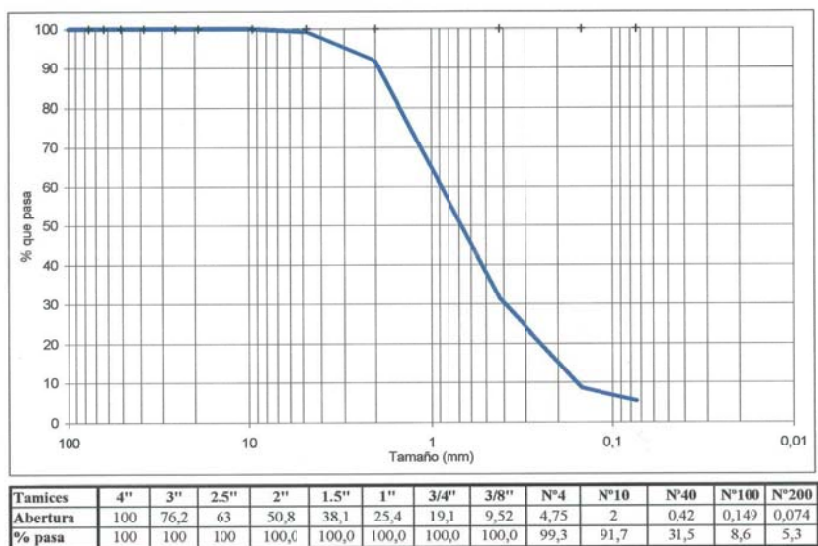
158- 3,40 m.jpg



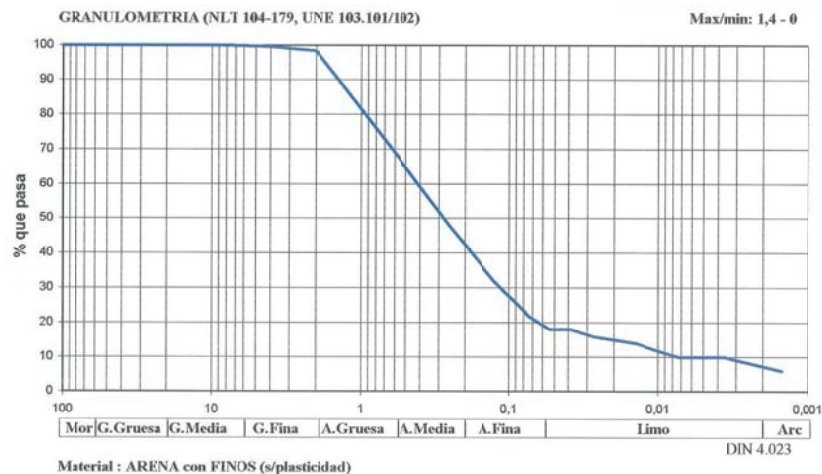
166- 17,40 m.jpg



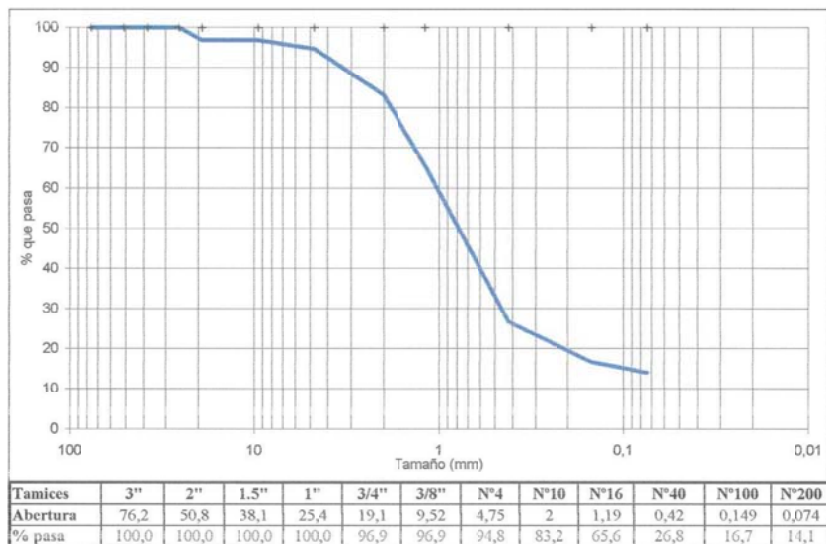
166- 7,40 m.jpg



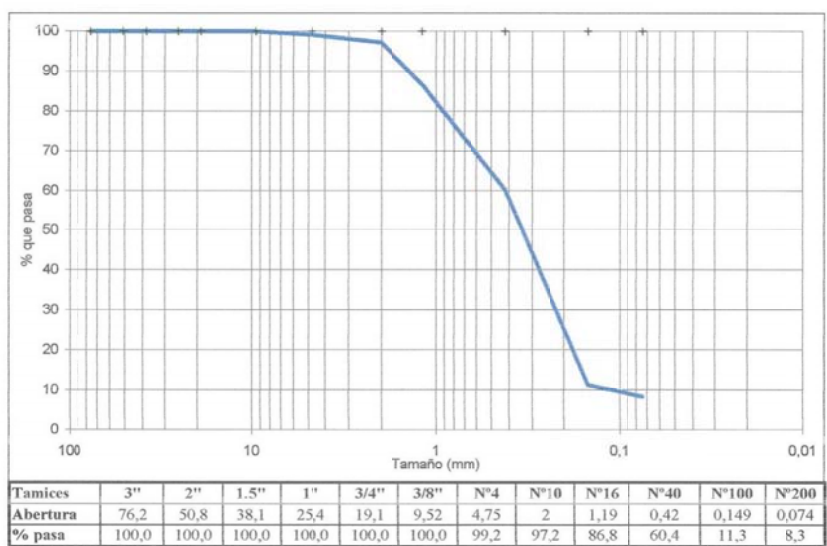
166- 7,80 m.jpg



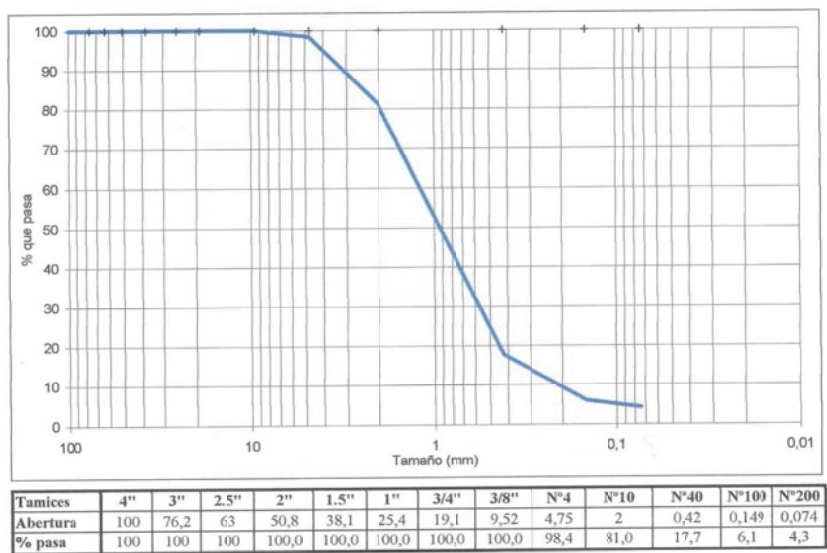
181- 7,2 m.jpg



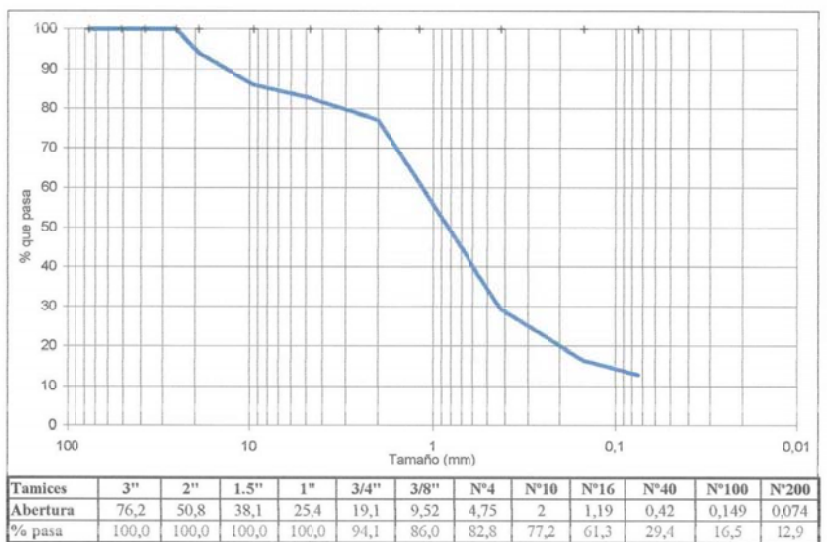
204- 2,4 m.jpg



245- 12,1 m.jpg



261- 8,40 m.jpg



303- 14,5 m.jpg

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

En cuanto a su morfoscopía, cabe destacar que la mediana de los sedimentos analizados corresponde a arena fina, predominando los granos superiores a 0,3 mm Ø, lo que corresponde a una fracción arenosa fina (0,27 mm de diámetro medio).

El índice de asimetría es elevado y de signo positivo (de 1,2 a 1,4 aproximadamente para los minerales transparentes). El de madurez es variable y oscila entre -8 y -10 de sur a norte.

En general, predominan los sedimentos de superficie deslustrada y mate subredondeados, y un alto porcentaje de granos rotos, especialmente en las inmediaciones de los cauces fluviales. Existen también granos menos evolucionados de mayor esfericidad y redondez, aunque en una fracción modal inferior, y especialmente en el sector meridional del sistema., al haberse detectado un grado de madurez creciente de sur a norte.

Se aprecia un porcentaje nada desdeñable de minerales opacos, en general pirita, con abundantes cambios de coloración que corresponden a diferentes estadios de oxidación.

La fracción fina se dispone adherida a los granos, en especial a los más rugosos. Se aprecia también un escaso porcentaje no combinado con fracciones granulométricas mayores.

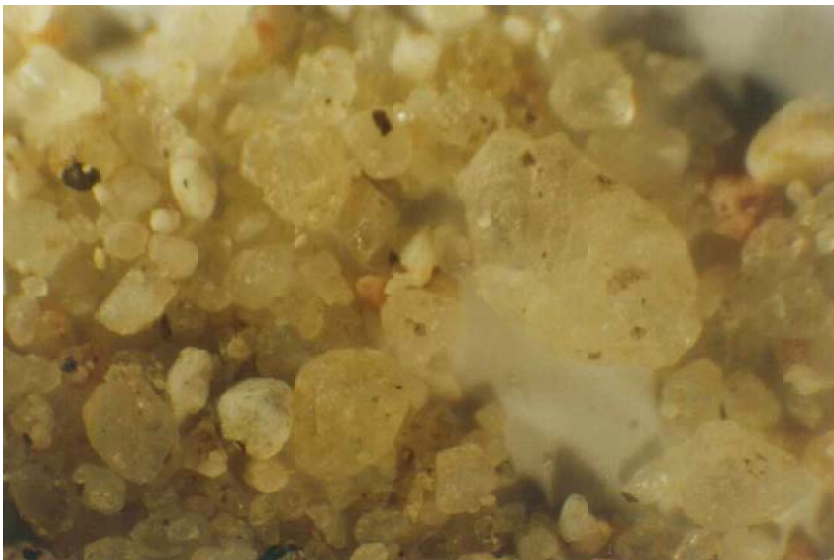
En ocasiones se han detectados granos de origen orgánico (esporas, polen, etc.).

Las muestras correspondientes al sustrato de los humedales salinos presentan forma típica de evaporitas, fractura concoidea y alta angulosidad.

Las muestras correspondientes a las facies Cuestas presentan una morfología similar a la anterior, si bien la coloración es más clara.



Sondeo-118- 1,7 m- 16x.jpg



Sondeo-118- 1,7 m- 6,3x.jpg



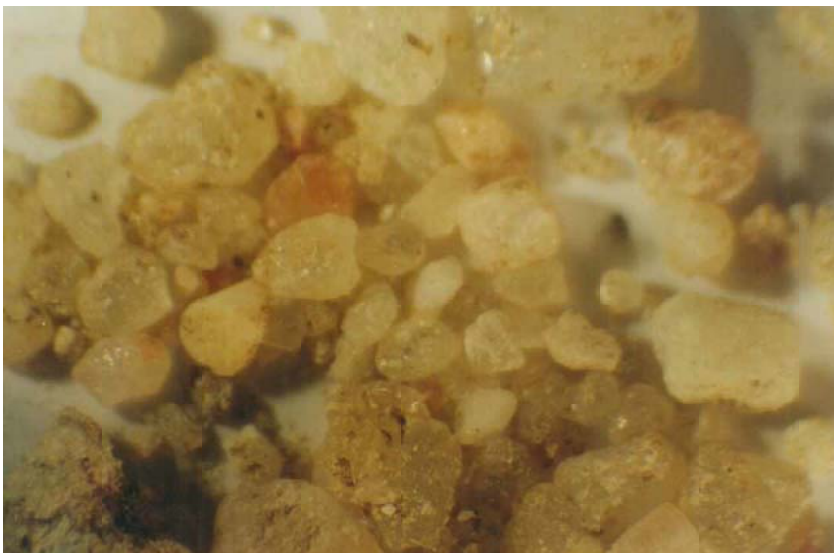
Sondeo-118- 8,2 m- 16x.jpg.jpg



Sondeo-118- 8,2 m- 6,3x.jpg



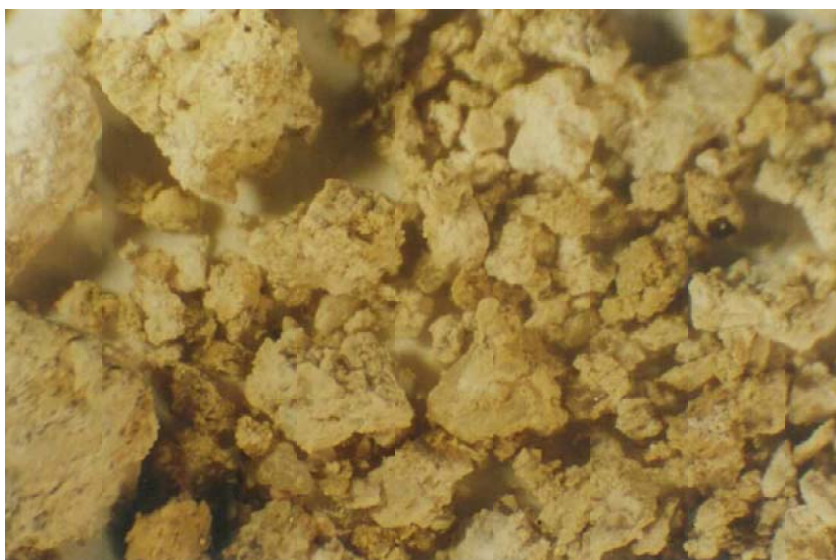
Sondeo-181- 2,4 m- 16x.jpg.jpg



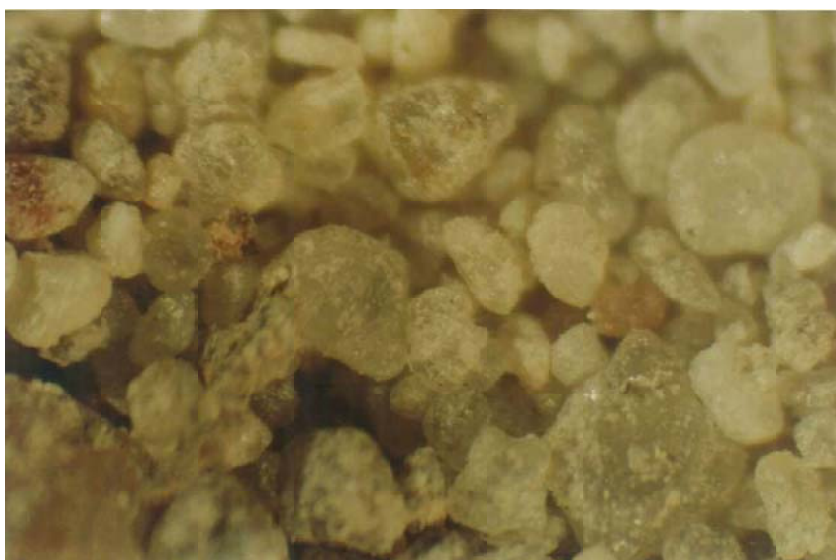
Sondeo-181- 2,4 m- 6,3x.jpg.jpg



Sondeo-20- 14 m- 16x.jpg.jpg



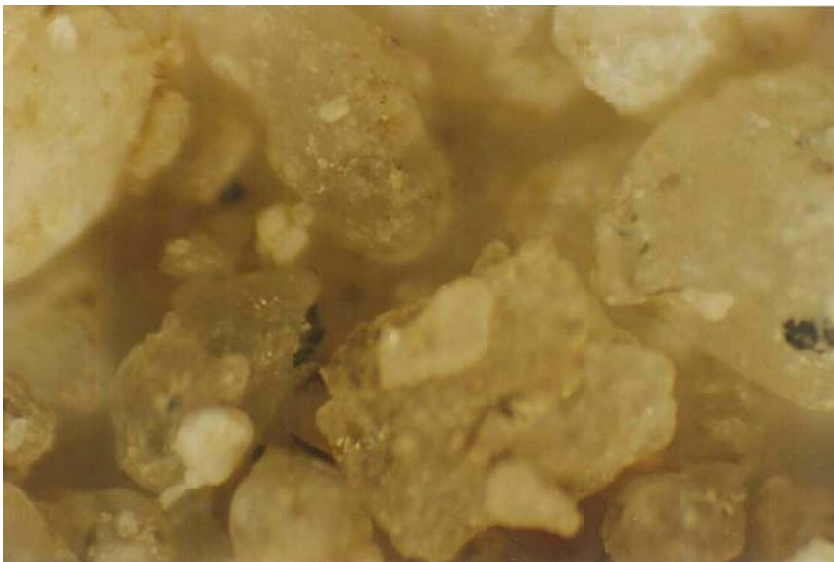
Sondeo-20- 14 m- 6x.jpg.jpg



Sondeo-20-0,8 m- 16x.jpg.jpg



Sondeo-20-0,8 m- 6,3x.jpg.jpg



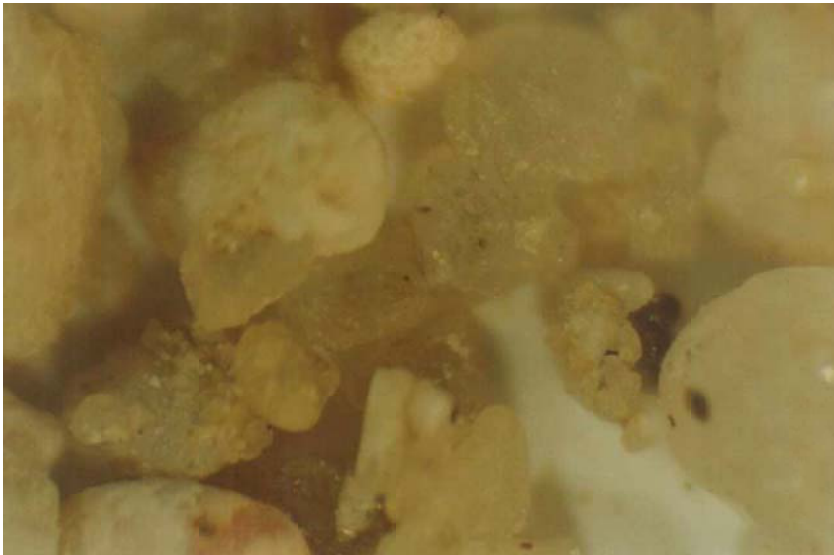
Sondeo-204- 1,2 m- 16x.jpg



Sondeo-204- 1,2 m- 6,3x.jpg



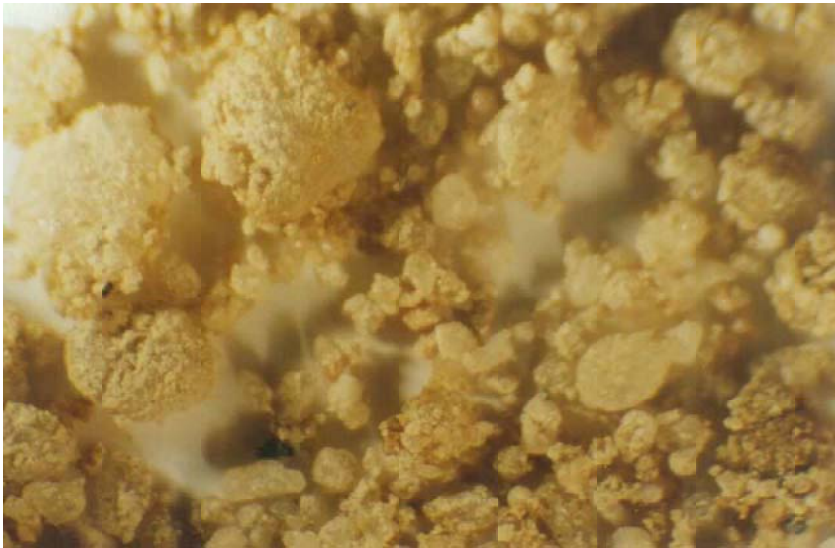
Sondeo-245- 1,3 m- 6,3x.jpg.jpg



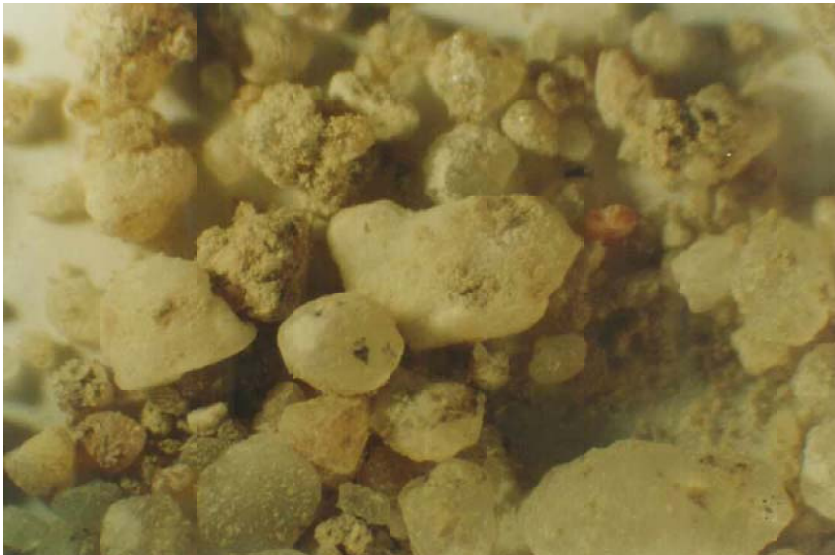
Sondeo-245- 1,3 m-16x.jpg.jpg



Sondeo-303- 1 m- 16x.jpg.jpg



Sondeo-303- 1 m- 6,3x.jpg.jpg



Sondeo-84 - 2,0 m-6,3x.jpg



Sondeo-84- 13,8 m- 16x.jpg



Sondeo-84- 13,8 m- 6,3x.jpg



Sondeo-84- 2 m- 16x.jpg.jpg



suelos-Caballo Alba 0,1 16x.jpg.jpg



suelos-Caballo alba 0,1 6,3x.jpg



suelos-Cuestas Coca 16x.jpg.jpg



suelos-Cuestas Coca 6,3x.jpg.jpg



suelos-Iglesia 0,1 6,3x.jpg.jpg



suelos-laguna iglesia 0,1 16x.jpg.jpg



suelos-las Eras 0,1 16x.jpg



suelos-las Eras 0,1 6,3x.jpg



suelos-Sanchon 0,3 16x.jpg



suelos-Sanchon 0,3 6,3x.jpg

MUESTREO DE LA FRACCIÓN SÓLIDA.

DATOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL PUNTO DE MUESTREO.

DISPONIBILIDAD DE FOTOGRAFÍAS EN LUPA BINOCULAR.

Código*	X	Y	Z s0	PROF. Tot	NESNMT	NE_MSNM	FECHA**	pH agua	C ag (µS/cm)	TDS	MICRO 16X	MICRO 25X	MICRO 40X
20- 80 CM	367419	4570177	763,0	29,39	5,65	757,35	1/13/03	8,6	755	0,36	1 22		1 23
57- 10,0 M	367419	4570177	763,0	29,39	5,65	757,35	1/13/03	8,6	755	0,36	1 24		
84- 14,0 M	367419	4570177	763,0	29,39	5,65	757,35	1/13/03	8,6	755	0,36	1 25		1 26
104- 2,0 M	369306	4566315	778,7	20,57	11,11	767,59	1/13/03	7,5	1090	0,54	2 1		2 2
122- 13,8 M	369306	4566315	778,7	20,57	11,11	767,59	1/13/03	7,5	1090	0,54	2 4		
118- 14,1 M	369306	4566315	778,7	20,57	11,11	767,59	1/13/03	7,5	1090	0,54	2 3		
158- 1,8 M	369787	4565325	780,9	20,6	11,67	769,23	1/13/03	7,8	610	0,3	2 5		
245- 13,7 M	369787	4565325	780,9	20,6	11,67	769,23	1/13/03	7,8	610	0,3	2 6		2 24
118- 1,7 M	370037	4564627	779,4	20	13,08	766,32	1/13/03	7,5	310	0,15	2 7		2 8
118- 8,2 M	370037	4564627	779,4	20	13,08	766,32	1/13/03	7,5	310	0,15	2 10		2 11
118- 14,4 M	370037	4564627	779,4	20	13,08	766,32	1/13/03	7,5	310	0,15	2 9		
245- 1,3 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,47	789,83	1/13/03	8	1020	0,5	2 12		2 13
245- 12,1 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,47	789,83	1/13/03	8	1020	0,5	2 15	2 16	
245- 15,5 M	369475	4559082	798,3	20,7	8,47	789,83	1/13/03	8	1020	0,5	2 14		
204- 1,2 M	369662	4560253	790,8	11,54	0,72	790,08	1/13/03	8,9	230	0,11	2 17		2 18
204- 2,4 M	369662	4560253	790,8	11,54	0,72	790,08	1/13/03	8,9	230	0,11	2 19		
303- 1,0 M	370474	4556999	803,8	28,3	19,8	784,00	1/13/03				1 1	1 3	1 2
303- 14,4 M	370474	4556999	803,8	28,3	19,8	784,00	1/13/03				1 4		1 5
181- 2,4 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,37	774,53	1/13/03	8,6	600	0,29	2 20	1 20	
181- 7,2 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,37	774,53	1/13/03	8,6	600	0,29	2 22		2 23
181- 8,5 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,37	774,53	1/13/03	8,6	600	0,29	2 21		
181- 12,5 M	370648	4560956	791,9	20,9	17,37	774,53	1/13/03		600	0,29		1 21	
1	371615	4563282	769,7	0	N/A	N/A	6/28/02	7,8	0,60		1 6		1 7
2	367939	4569405	768,0	0	N/A	N/A	6/28/02	8,1	0,70		1 8	1 9	
2	367939	4569405	768,0	0	N/A	N/A	1/13/03				1 18		1 19
3	368550	4562780	786,7	0	N/A	N/A	6/28/02	9	1,50		1 10	2 25	1 11
4	365500	4567250		0	N/A	N/A	6/28/02	9,5	2,10		1 12		1 13
5	370061	4562904	786,0	0	N/A	N/A	6/28/02	7,2	0,40		1 14	1 15	
6	369695	4560322	792,0	0	N/A	N/A	6/28/02	8,6	0,50		1 16		1 17

ANÁLISIS GEOQUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE SUELOS SUPERFICIALES

codigo	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	N t %	P (ppm)	MOO %	Na (meq/100g)	K (meq/100g)	Ca (meq /100g)	Mg (meq/100g)	arena %	limo %	arcilla %	cl
Facies Cuesta	194	62	45	0,021	8	0,12	0,384	1.841	29.411	12.467	11,85	33,8	54,35	ac
ZONA AVE	181	98	39	0,022	24	0,18	0,03	0,205	2.757	0,673	92,78	3,72	3,5	ar
Laguna de la l	259	204	168	0,105	20	1,12	7.984	3.325	11.407	15.929	4,95	27,25	67,8	ac
Laguna Cabal	285	373	188	0,053	21	0,54	21.956	3.325	2.952	10.345	14,55	17,15	68,3	ac
Arena Dunar	155	53	41	0,070	4	0,01	0,02	0,102	4.708	0,276	94,81	1,94	3,25	ar
Sanchón	194	44	162	0,015	4	0,10	0,175	0,307	4.496	1.704	90,53	2,87	6,6	ar

Coordenadas UTM

* N° de captación y profundidad.

** M/D/año

*** El código de las fotografías con lupa binocular es arbitrario

Muestras seleccionadas para la elaboración de láminas delgadas

COMENTARIOS DE LAS FOTOGRAFÍAS DE LAS LÁMINAS DELGADO-PULIDAS

Las fotografías que se presentan a continuación corresponden a láminas delgado-pulidas elaboradas con muestras tomadas en los siguientes puntos y profundidades:

Muestra	X	Y	Z	PROF. Tot	NE_NMT	NE_MSNM	FECHA	pH agua	C (µS/cm)	TDS
SW-4 1,8 M	369787	4565325	780.9	20.6	11.67	769	13/01/03			
SW-4 13,7 M	369787	4565325	780.9	20.6	11.67	769	13/01/03	7.8	610	0.3
SW-9 1,2 M	369662	4560253	790.8	11.54	0.72	790	13/01/03	8.9		
SW-8 1,3 M	369475	4559082	798.3	20.7	8.47	790	13/01/03	8		
SW-8 15,5 M	369475	4559082	798.3	20.7	8.47	790	13/01/03	8	1020	0.5

Los nombres de cada fotografía sintetizan en sondeo donde han sido tomadas, la profundidad y la magnificación de la fotografía, así como si la toma es con nícoles paralelos o cruzados o bien si corresponde a la zona no saturada del acuífero (ZNS) o saturada (ZS).

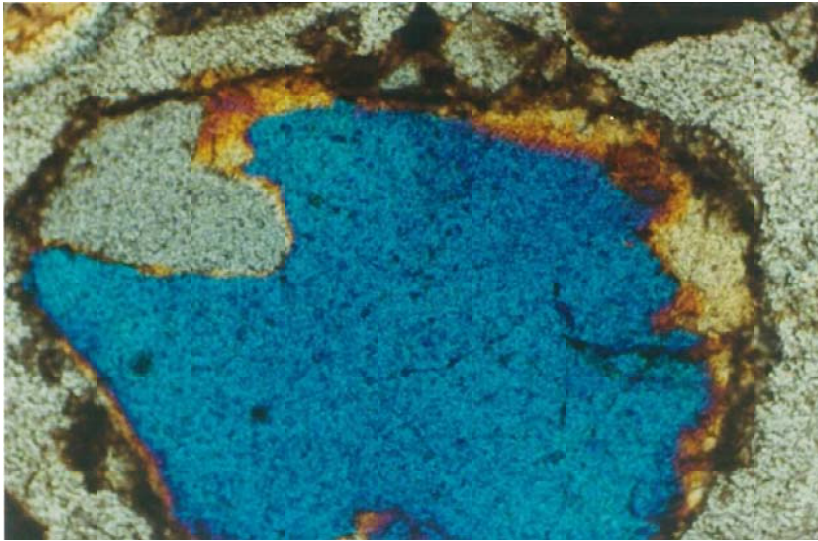
Las muestras han sido seleccionadas por su ubicación en el sistema, obteniendo una en la zona con mayor abundancia de hierro y presencia de reacciones típicas de ambientes reductores (sondeo 104 del inventario), en la UHA septentrional oriental, zona del *Pinar Nuevo* de Ciruelos de Coca.

La segunda muestra queda localizada en la falda Oeste del Cuerno de la Revilla, junto al camino del Ramirón, al noreste de Santiuste (sondeo 245 del inventario). Se encuentra en una zona de la cubeta con presencia de procesos contaminantes en la que la capacidad de autodepuración del terreno ha demostrado alcanzar tasas muy altas. Se encuentra en la UHA meridional occidental.

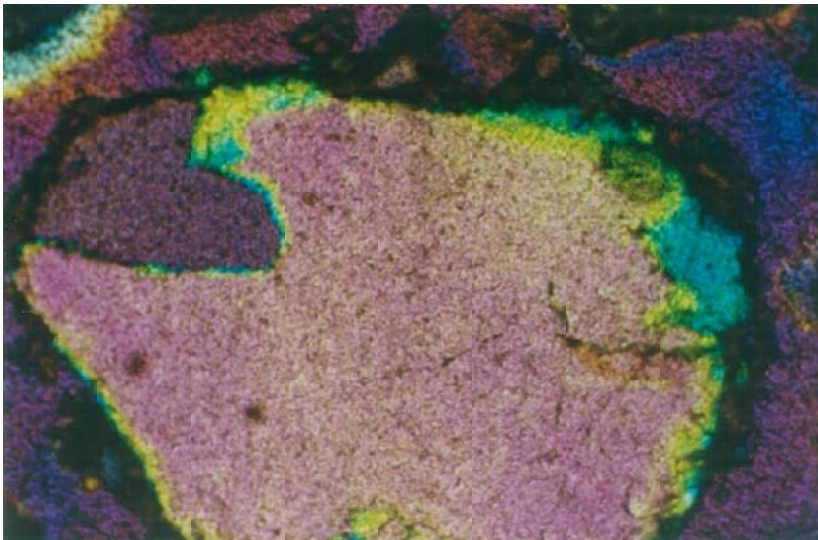
La tercera ha sido tomada en la zona del Sanchón, en la cabecera de la cacera de Betaya, donde se ha detectado una zona del acuífero que funciona como dren. El nivel del agua se encuentra a escasa profundidad, correspondiendo la muestra a la zona saturada a pesar de haber sido muestrada a 1,2 m.

En ambos sondeos se ha elaborado una lámina para la zona saturada y otra para la no saturada, con objeto de intentar deducir diferencias en el litotipo como consecuencia de la circulación de las aguas subterráneas.

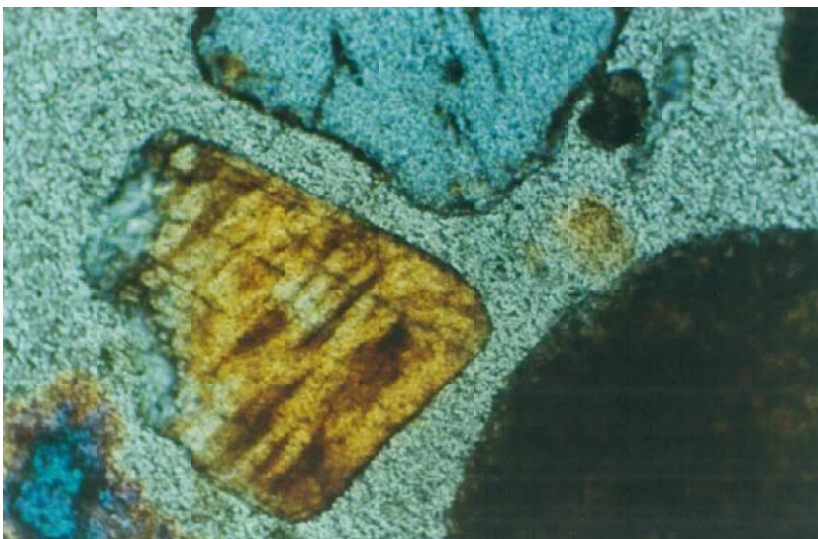
La observación de las láminas con microscopio de luz polarizada ha permitido diferenciar, además de cuarzo que representa el porcentaje modal ultradominante, una fracción de feldespatos importante y los siguientes minerales como microconstituyentes y trazas: turmalina, circón, granates, rutilo, estauroilita, distena, andalucita, sillimanita, epidota, hornblenda, clorita, apatito y alteritas. Precisamente es en las alteritas donde se localizan las fases más importantes del sistema para los fines pretendidos, al haberse localizado pátinas de oxidación con coloración y textura típica de óxidos de hierro en la mayor parte de las muestras. Esta observación confirma la hipótesis de que la mayor parte del hierro en las aguas subterráneas del sistema se encuentra en forma de sesquióxidos de hierro.



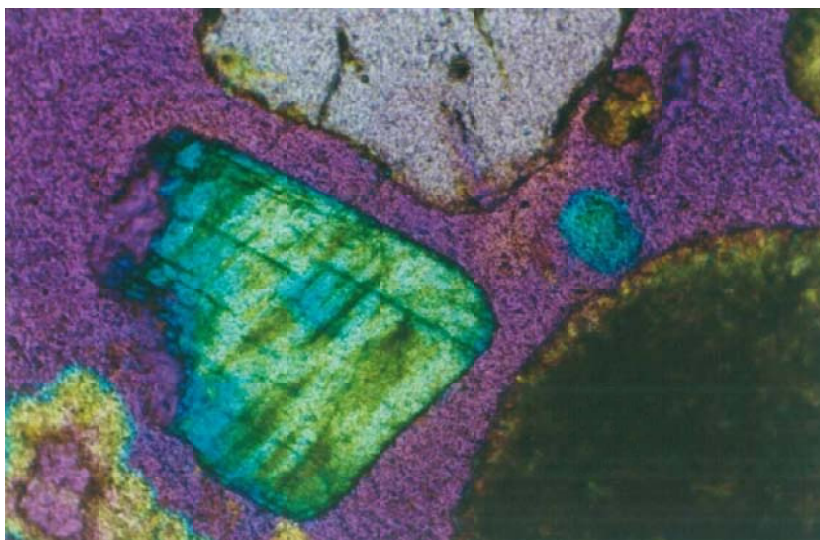
4zns 10x 45-24 np.jpg



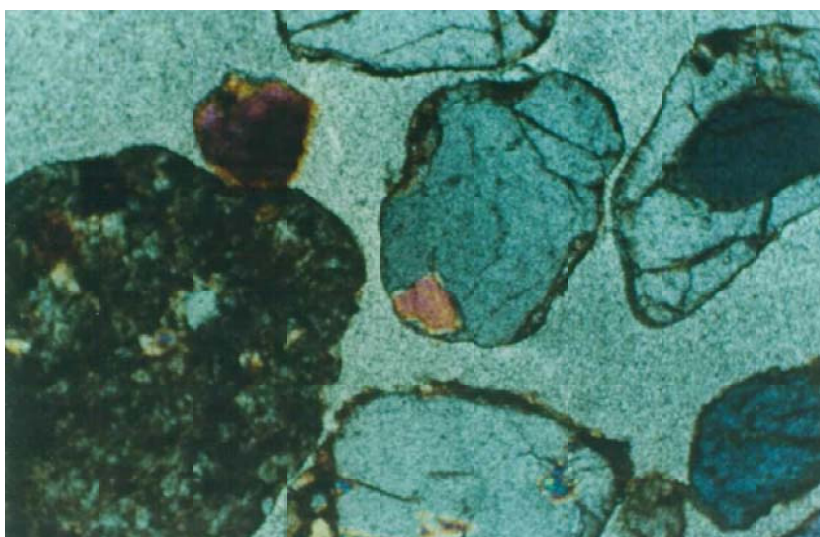
4zns 10x 45-24 nX.jpg



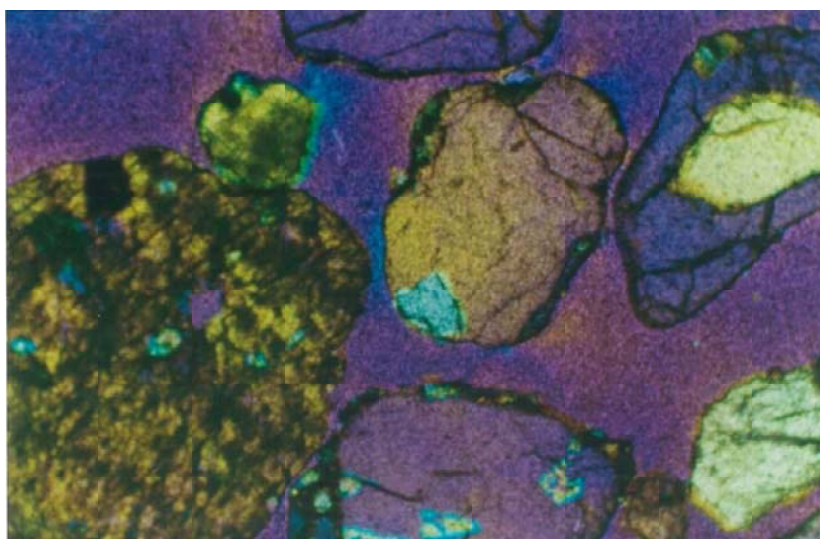
4zns 10x 57-15 np.jpg



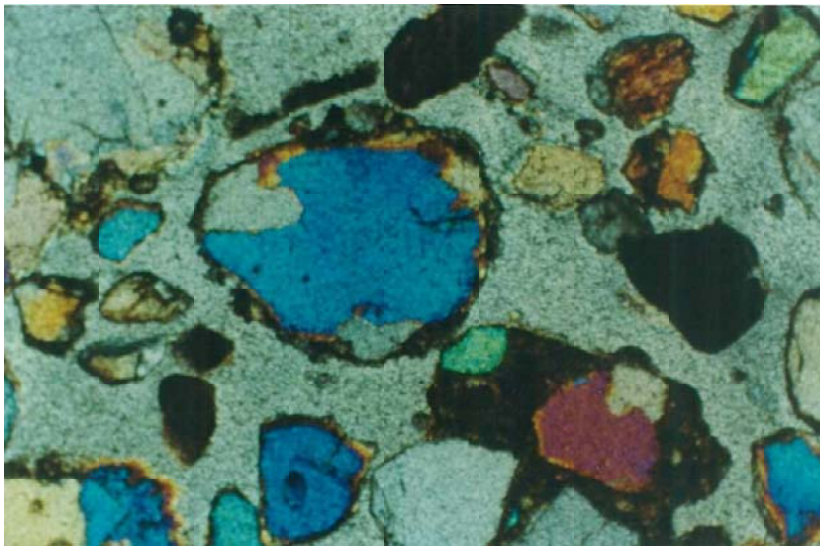
4zns 10x 57-15 nX.jpg



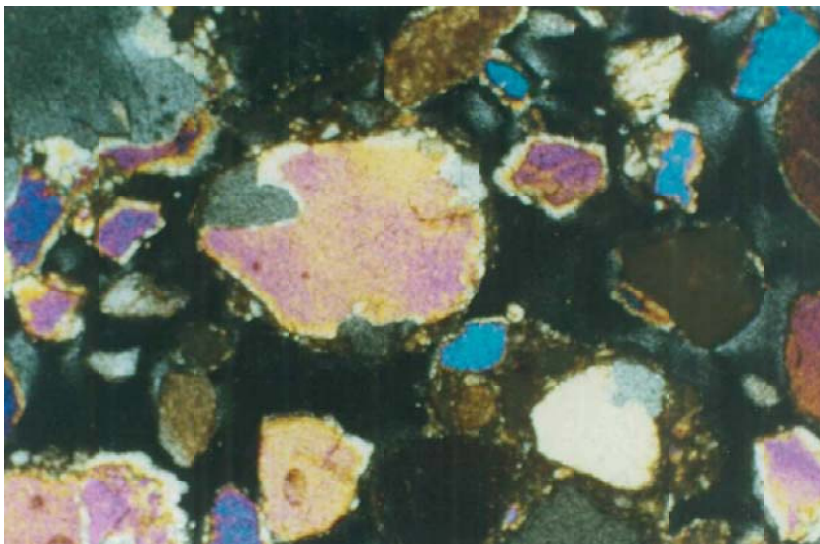
4zns 4x 45-10 nP.jpg



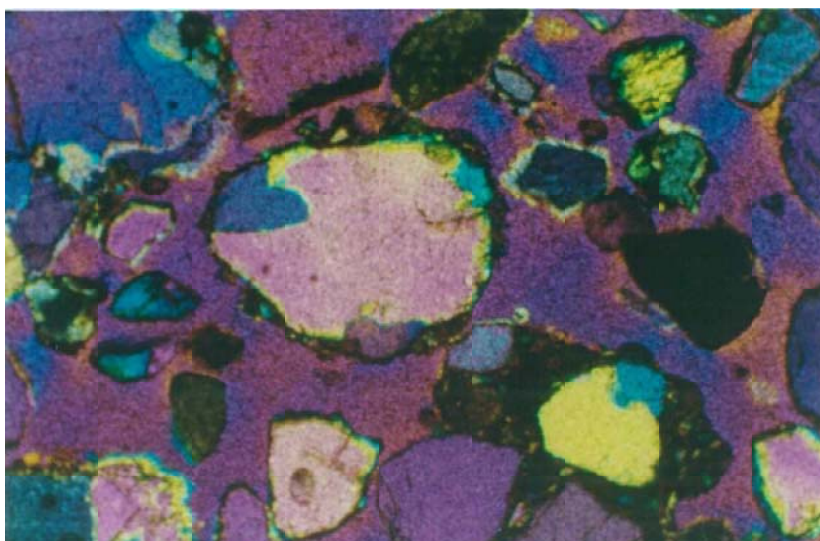
4zns 4x 45-10 nX.jpg



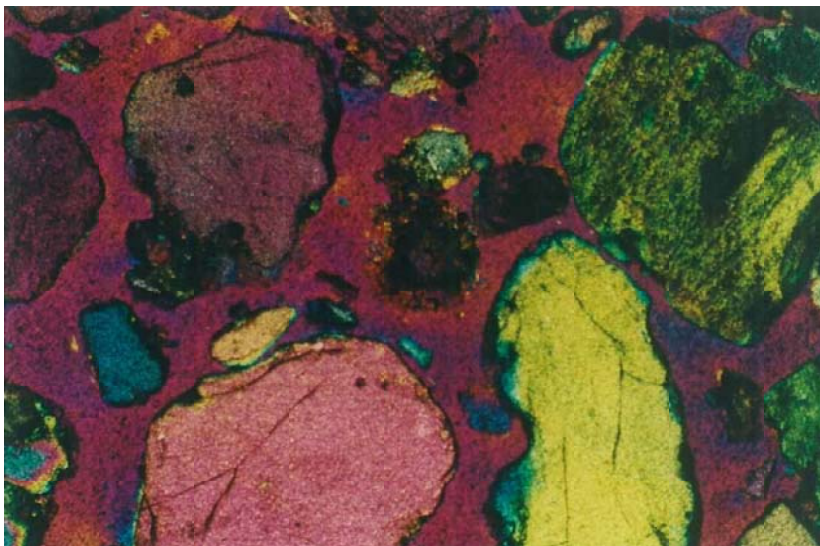
4zns 4x 45-24 np.jpg



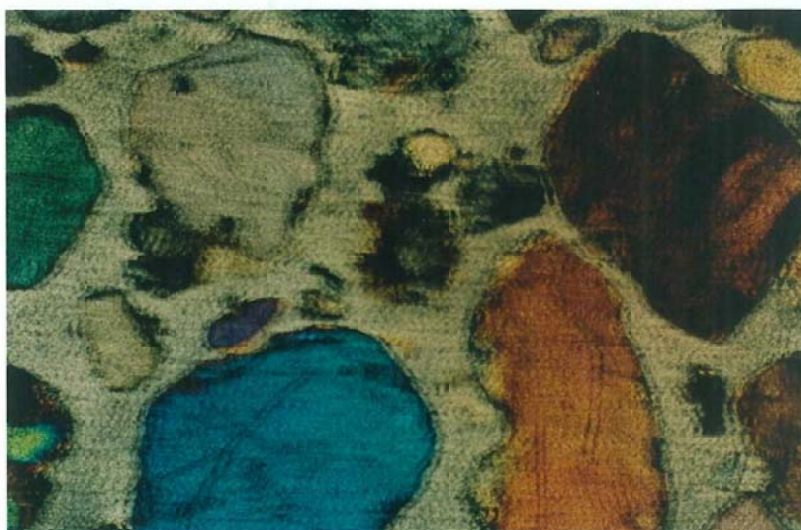
4zns 4x 45-24 np2.jpg



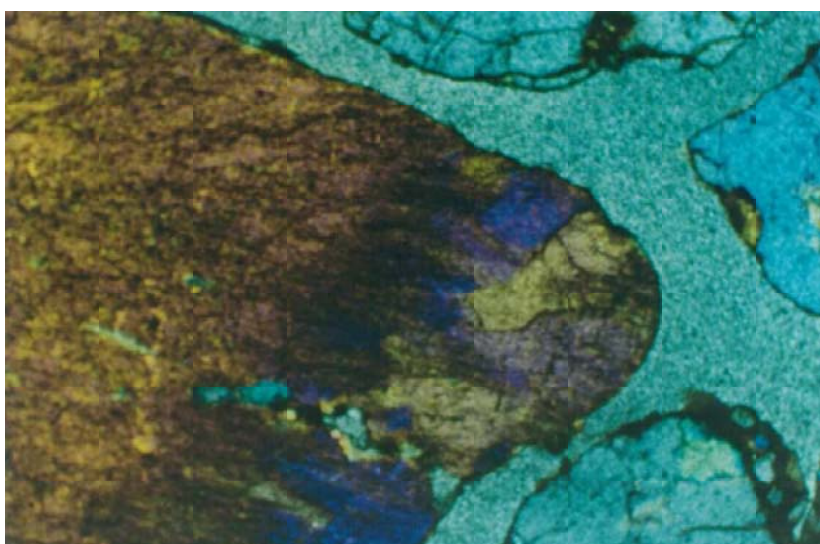
4zns 4x 45-24 nX.jpg



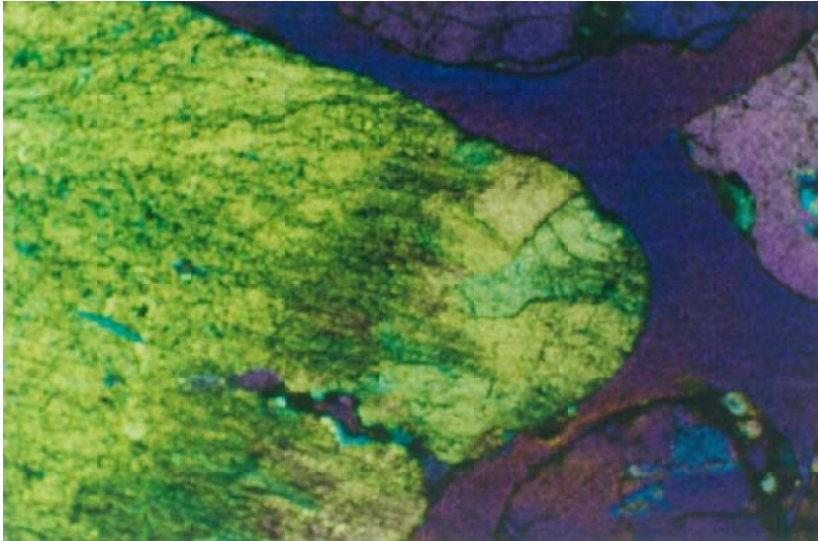
4zns 4x 47-21,5 nX.jpg



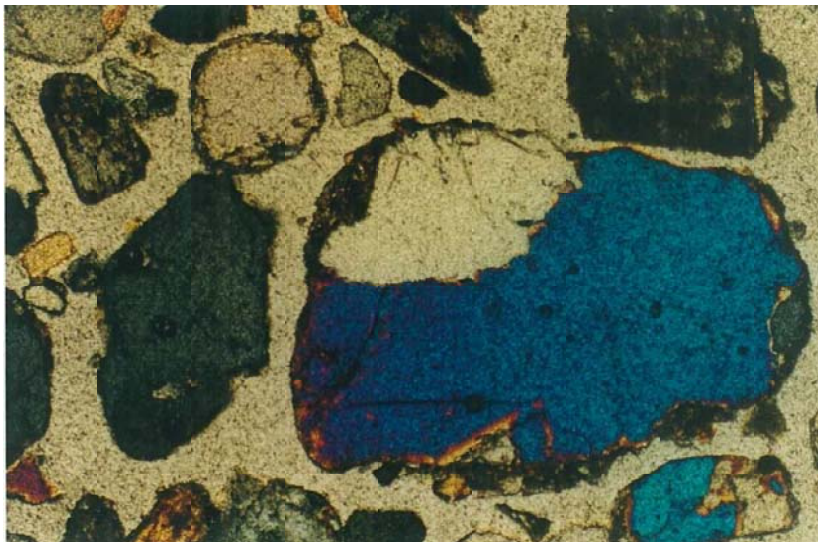
4zns 4x 47-21,5.jpg



4zns 4x 47-7,5 nP.jpg



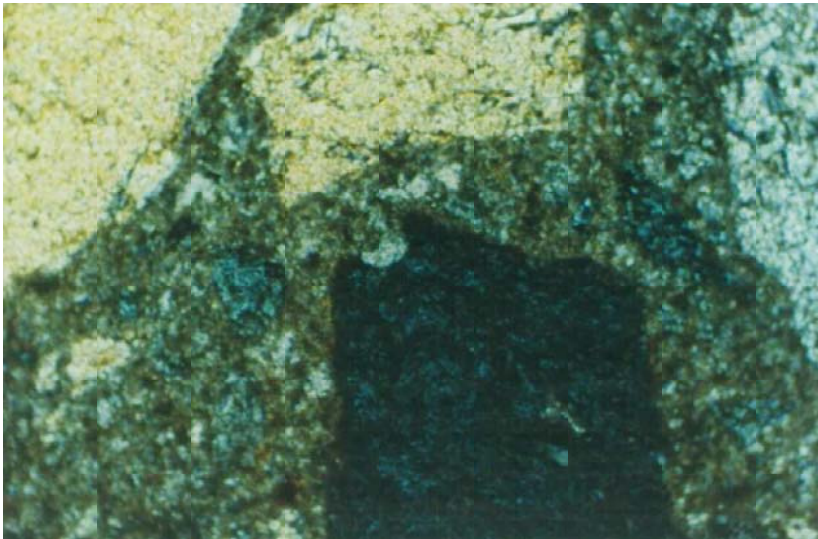
4zns 4x 47-7,5 nX.jpg



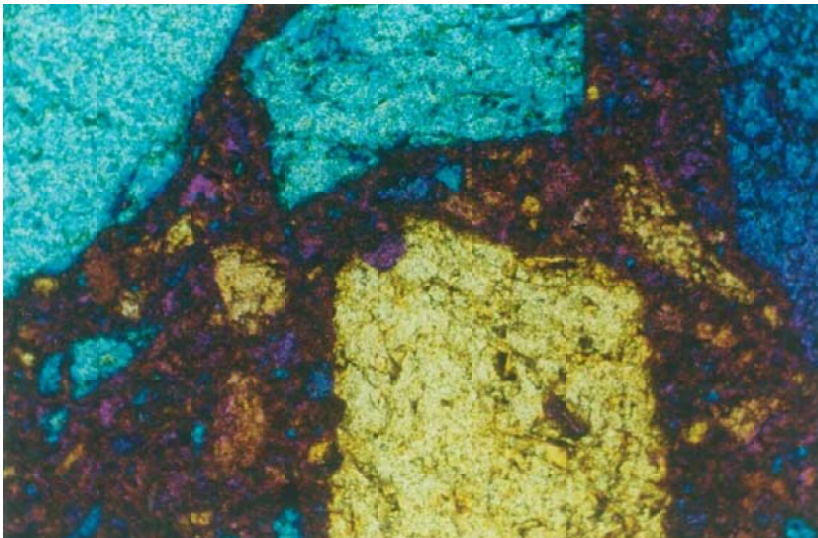
4zns 4x 58-25 np.jpg



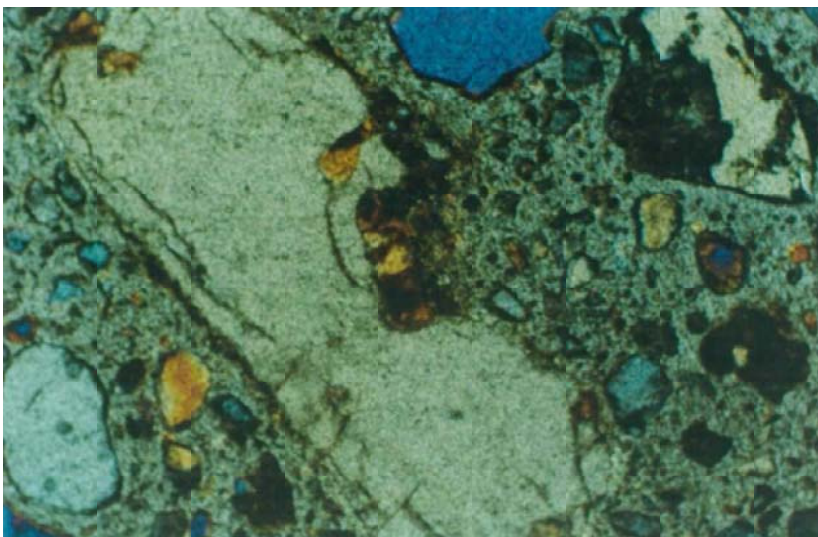
4zns 4x 58-25 nX.jpg



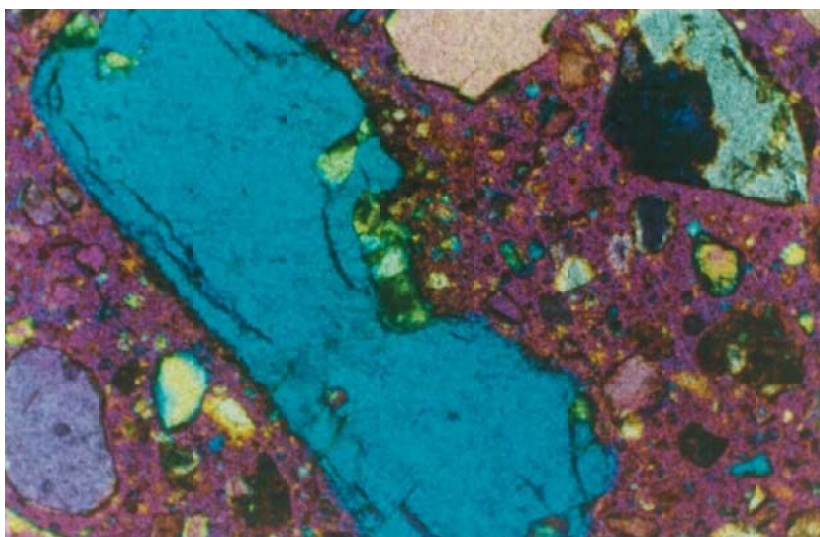
4zs 10x 69-9 nP.jpg



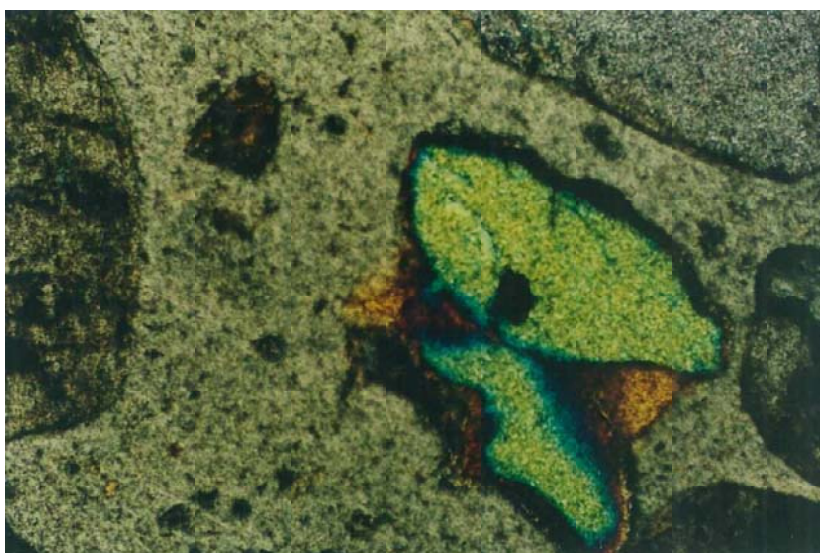
4zs 10x 69-9 nX.jpg



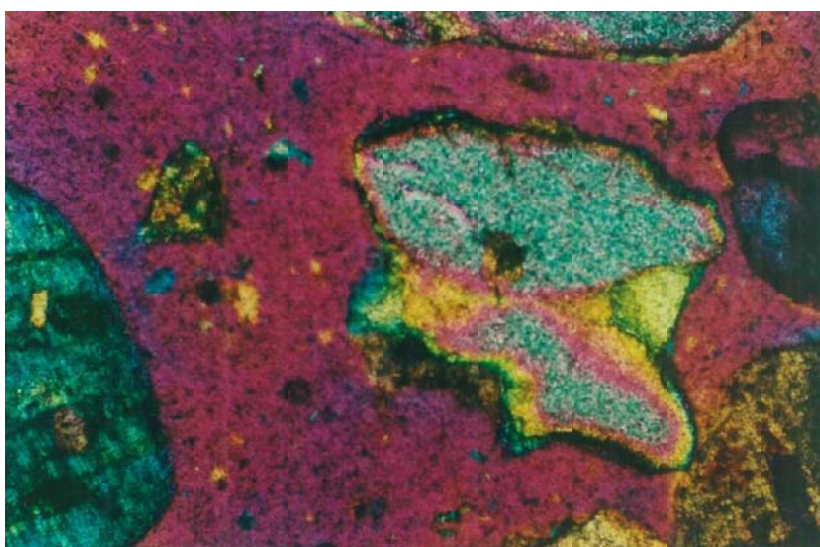
4zs 4x 57-24 nP.jpg



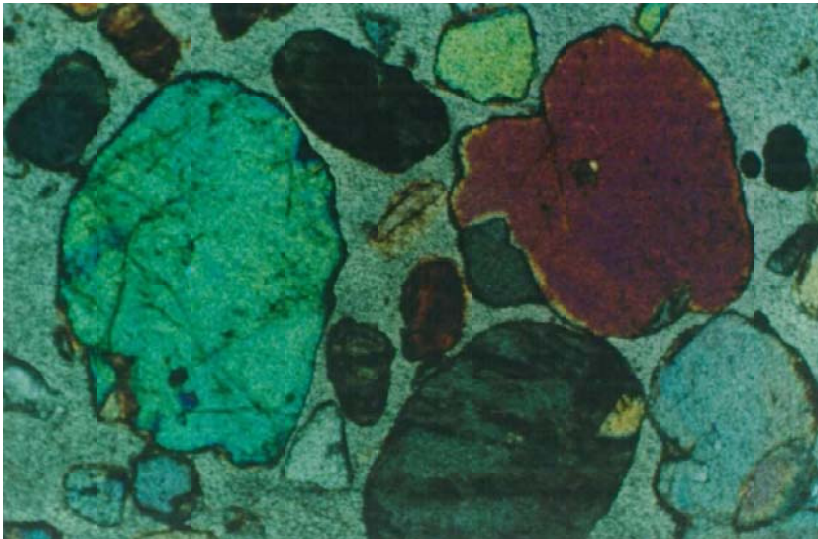
4zs 4x 57-24 nX.jpg



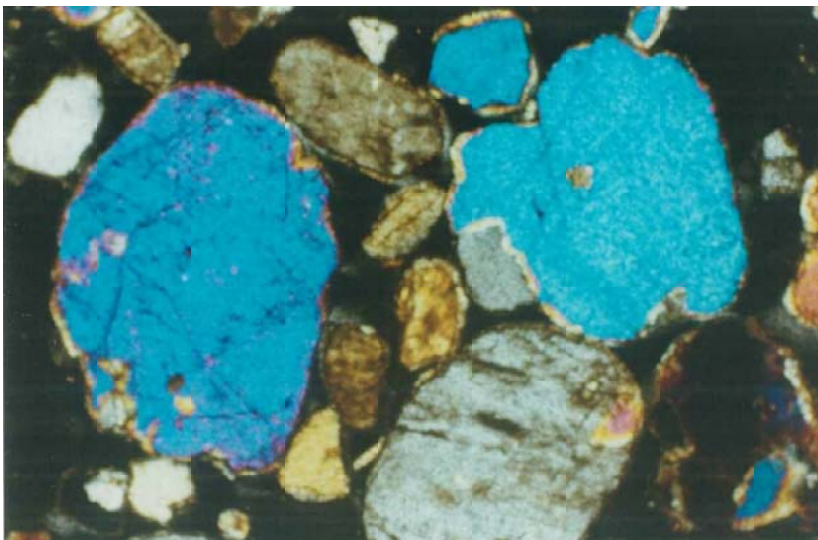
8zns 10x 52-24 np.jpg



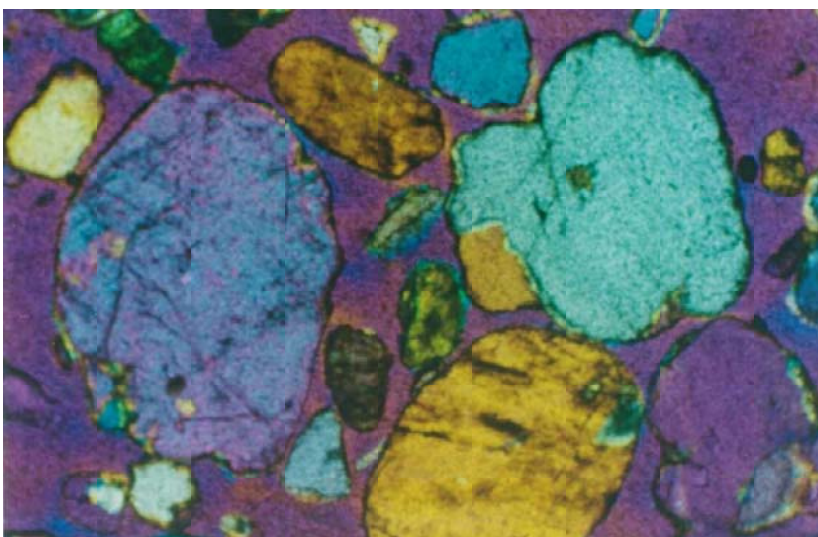
8zns 10x 52-24 nX.jpg



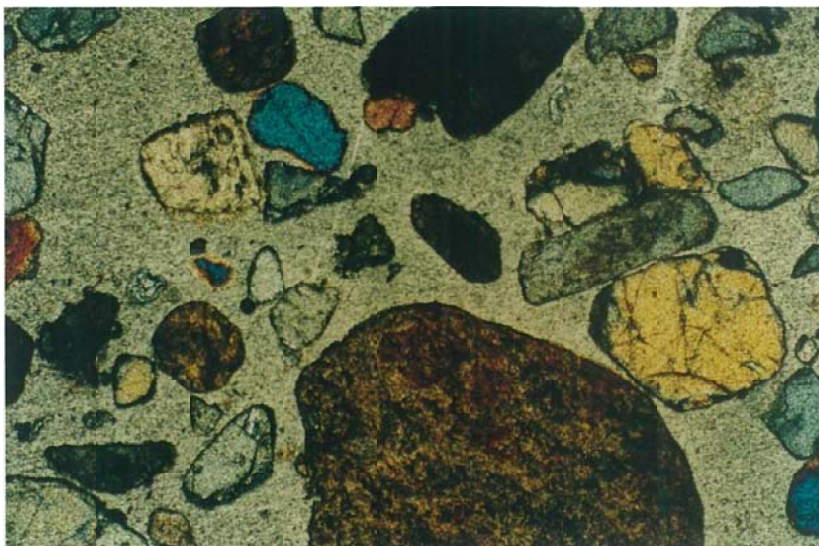
8zns 4x 48-36 nP.jpg



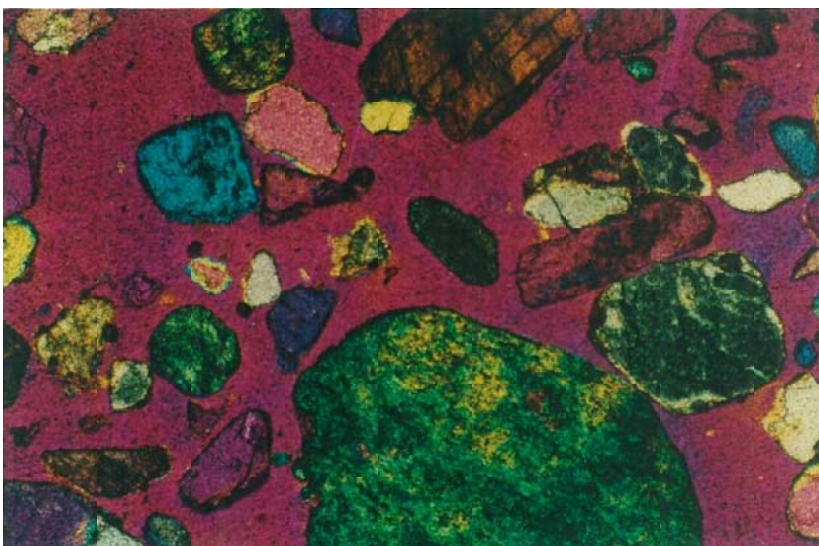
8zns 4x 48-36 nP2.jpg



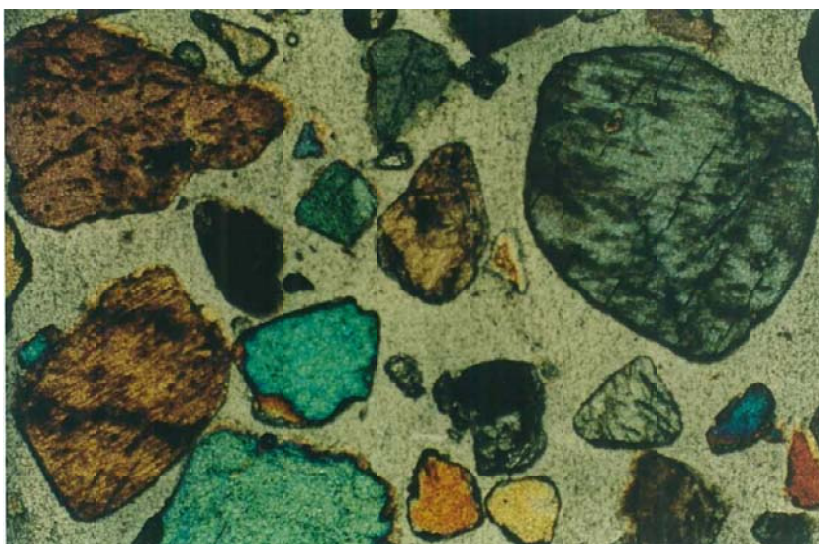
8zns 4x 48-36 nX.jpg



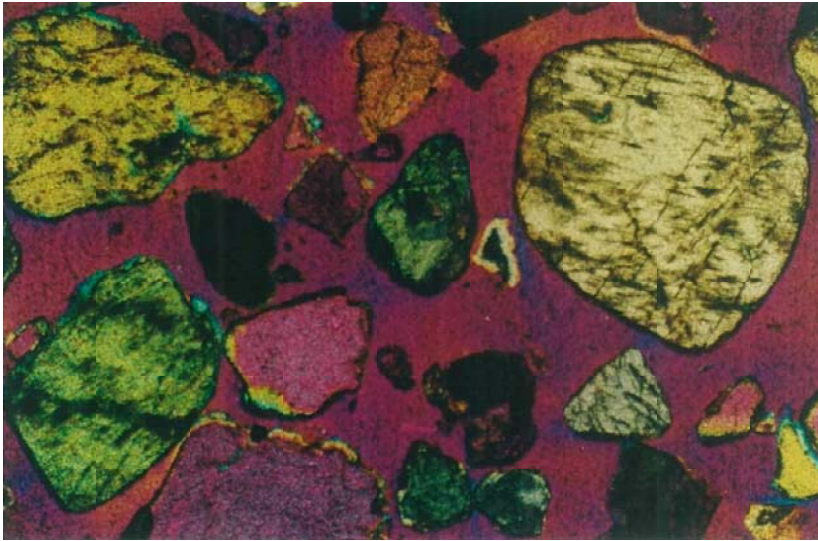
8zns 4x 49-10 np.jpg



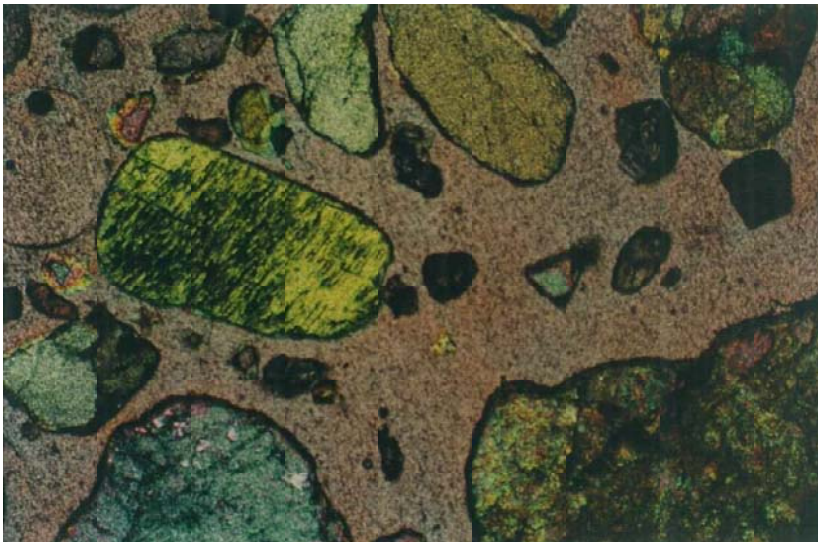
8zns 4x 49-10 nX.jpg



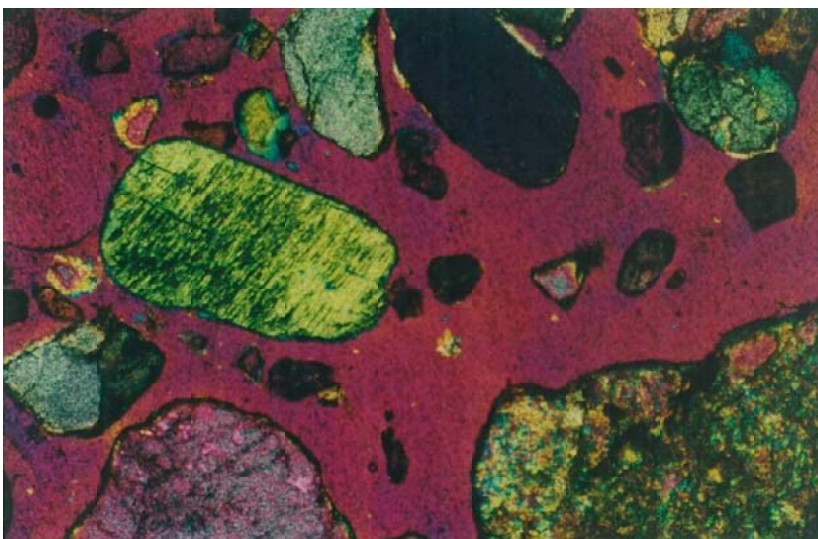
8zns 4x 50-21 np.jpg



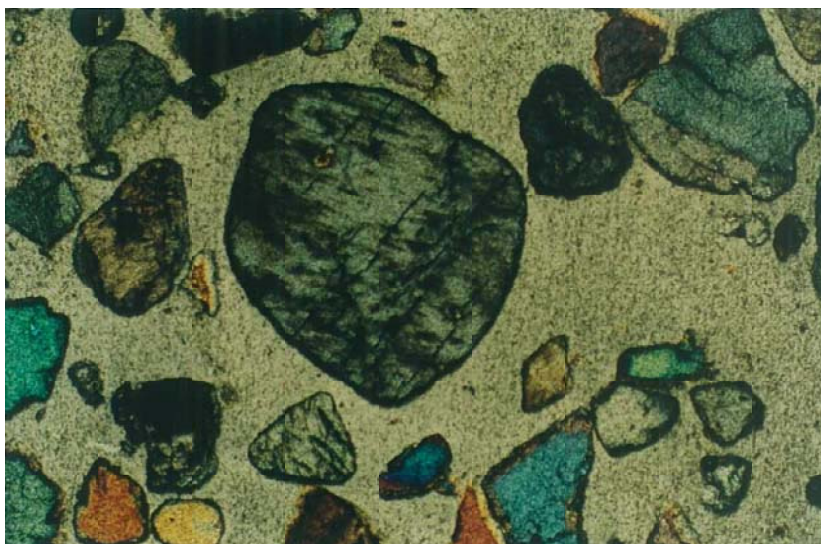
8zns 4x 50-21 nX.jpg



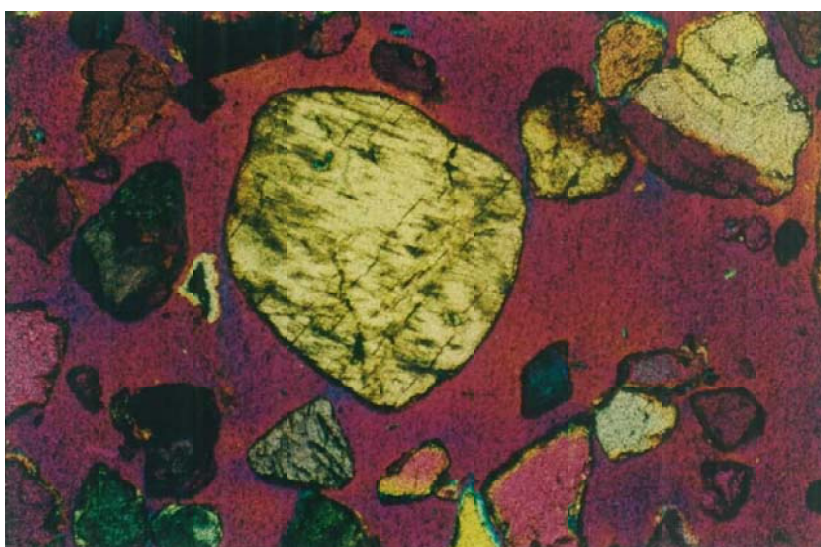
8zns 4x 50-26 np.jpg



8zns 4x 50-26 nX.jpg



8zns 4x 51-20 np.jpg



8zns 4x 51-20 nX.jpg

BLOQUE 3. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

3.3. RESUMEN DE RESULTADOS DEL CÓDIGO PHREEQC DE MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA



Muestra 5

Reading data base.

```
SOLUTION_MASTER_SPECIES
SOLUTION_SPECIES
PHASES
EXCHANGE_MASTER_SPECIES
EXCHANGE_SPECIES
SURFACE_MASTER_SPECIES
SURFACE_SPECIES
END
```

Reading input data for simulation 1.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 2.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 3.

```
SOLUTION 5 5          CUBETA SANTI CUATERNARIO  Ca-Mg-Na-HCO3-N 0005
(09)
      units mmol/l
      pH      8
      pe      4
      density      1
      temp     14
      redox    pe
      O(0)    0.1034698
      Ca      3.767465
      Mg      2.714932
      Na      4.349718
      K       0.4347826
      Si      0.3201598
      Cl      1.297493
      Alkalinity 5.32717 as HCO3
      S       1.74898
      N(+5)  4.370263
      END
```

Beginning of initial solution calculations.

```
Initial solution 5. 5          CUBETA SANTI CUATERNARIO  Ca-Mg-Na-HCO3-N 0005
(09)
```

-----Solution composition-----

-

Elements	Molality	Moles
----------	----------	-------

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Alkalinity	5.332e-03	5.332e-03
Ca	3.771e-03	3.771e-03
Cl	1.299e-03	1.299e-03
K	4.352e-04	4.352e-04
Mg	2.718e-03	2.718e-03
N(5)	4.374e-03	4.374e-03
Na	4.354e-03	4.354e-03
O(0)	1.036e-04	1.036e-04
S	1.751e-03	1.751e-03
Si	3.205e-04	3.205e-04

-----Description of solution-----

-

pH	=	8.000
pe	=	4.000
Activity of water	=	1.000
Ionic strength	=	2.204e-02
Mass of water (kg)	=	1.000e+00
Total carbon (mol/kg)	=	5.354e-03
Total CO2 (mol/kg)	=	5.354e-03
Temperature (deg C)	=	14.000
Electrical balance (eq)	=	3.260e-03
Iterations	=	7
Total H	=	1.110189e+02
Total O	=	5.554368e+01

-----Redox couples-----

-

Redox couple	pe	Eh (volts)
O(-2)/O(0)	13.3954	0.7632

-----Distribution of species-----

-

	Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma
C (4)	OH-	4.792e-07	4.140e-07	-6.319	-6.383	-0.064
	H+	1.126e-08	1.000e-08	-7.948	-8.000	-0.052
	H2O	5.551e+01	9.996e-01	0.000	0.000	0.000
		5.354e-03				
	HCO3-	4.960e-03	4.331e-03	-2.305	-2.363	-0.059
	CO2	1.152e-04	1.158e-04	-3.938	-3.936	0.002
	CaHCO3+	1.001e-04	8.745e-05	-3.999	-4.058	-0.059
	MgHCO3+	8.067e-05	7.004e-05	-4.093	-4.155	-0.061
	CaCO3	4.335e-05	4.357e-05	-4.363	-4.361	0.002
	CO3-2	2.706e-05	1.573e-05	-4.568	-4.803	-0.235
Ca	MgCO3	1.807e-05	1.816e-05	-4.743	-4.741	0.002
	NaHCO3	9.124e-06	9.171e-06	-5.040	-5.038	0.002
	NaCO3-	7.142e-07	6.201e-07	-6.146	-6.208	-0.061
		3.771e-03				
	Ca+2	3.368e-03	1.958e-03	-2.473	-2.708	-0.236
	CaSO4	2.593e-04	2.606e-04	-3.586	-3.584	0.002
	CaHCO3+	1.001e-04	8.745e-05	-3.999	-4.058	-0.059
	CaCO3	4.335e-05	4.357e-05	-4.363	-4.361	0.002
	CaOH+	3.742e-08	3.249e-08	-7.427	-7.488	-0.061
		1.299e-03				
Cl	Cl-	1.299e-03	1.123e-03	-2.886	-2.950	-0.063
H (0)		1.448e-27				
	H2	7.238e-28	7.275e-28	-27.140	-27.138	0.002
K		4.352e-04				
	K+	4.332e-04	3.746e-04	-3.363	-3.426	-0.063
	KSO4-	1.960e-06	1.701e-06	-5.708	-5.769	-0.061
	KOH	1.292e-10	1.298e-10	-9.889	-9.887	0.002
Mg		2.718e-03				

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

	Mg+2	2.434e-03	1.433e-03	-2.614	-2.844	-0.230
	MgSO4	1.847e-04	1.857e-04	-3.733	-3.731	0.002
	MgHCO3+	8.067e-05	7.004e-05	-4.093	-4.155	-0.061
	MgCO3	1.807e-05	1.816e-05	-4.743	-4.741	0.002
	MgOH+	2.135e-07	1.854e-07	-6.671	-6.732	-0.061
N (5)		4.374e-03				
	NO3-	4.374e-03	3.768e-03	-2.359	-2.424	-0.065
Na		4.354e-03				
	Na+	4.329e-03	3.766e-03	-2.364	-2.424	-0.061
	NaSO4-	1.500e-05	1.303e-05	-4.824	-4.885	-0.061
	NaHCO3	9.124e-06	9.171e-06	-5.040	-5.038	0.002
	NaCO3-	7.142e-07	6.201e-07	-6.146	-6.208	-0.061
	NaOH	2.474e-09	2.487e-09	-8.607	-8.604	0.002
O (0)		1.036e-04				
	O2	5.178e-05	5.205e-05	-4.286	-4.284	0.002
S (-2)		0.000e+00				
	HS-	0.000e+00	0.000e+00	-71.727	-71.790	-0.064
	H2S	0.000e+00	0.000e+00	-72.650	-72.647	0.002
	S-2	0.000e+00	0.000e+00	-76.809	-77.048	-0.239
S (6)		1.751e-03				
	SO4-2	1.290e-03	7.420e-04	-2.890	-3.130	-0.240
	CaSO4	2.593e-04	2.606e-04	-3.586	-3.584	0.002
	MgSO4	1.847e-04	1.857e-04	-3.733	-3.731	0.002
	NaSO4-	1.500e-05	1.303e-05	-4.824	-4.885	-0.061
	KSO4-	1.960e-06	1.701e-06	-5.708	-5.769	-0.061
	HSO4-	6.611e-10	5.739e-10	-9.180	-9.241	-0.061
Si		3.205e-04				
	H4SiO4	3.169e-04	3.185e-04	-3.499	-3.497	0.002
	H3SiO4-	3.584e-06	3.112e-06	-5.446	-5.507	-0.061
	H2SiO4-2	1.734e-11	9.850e-12	-10.761	-11.007	-0.246

-----Saturation indices-----

-

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-1.50	-5.84	-4.33	CaSO4
Aragonite	0.76	-7.51	-8.27	CaCO3
Calcite	0.91	-7.51	-8.43	CaCO3
Chalcedony	0.19	-3.50	-3.68	SiO2
Chrysotile	-1.14	32.47	33.61	Mg3Si2O5(OH)4
CO2(g)	-2.61	-20.80	-18.19	CO2
Dolomite	1.67	-15.16	-16.83	CaMg(CO3)2
Gypsum	-1.25	-5.84	-4.59	CaSO4·2H2O
H2(g)	-24.04	-24.00	0.04	H2
H2S(g)	-71.78	-115.13	-43.35	H2S
O2(g)	-1.38	-4.28	-2.91	O2
Quartz	0.65	-3.50	-4.15	SiO2
Sepiolite	-0.24	15.82	16.06	Mg2Si3O7·5OH·3H2O
Sepiolite(d)	-2.84	15.82	18.66	Mg2Si3O7·5OH·3H2O
SiO2(a)	-0.69	-3.50	-2.81	SiO2
Sulfur	-53.80	-91.13	-37.33	S
Talc	2.78	25.48	22.70	Mg3Si4O10(OH)2

End of simulation.

Reading input data for simulation 4.

End of run.

10

Reading data base.

SOLUTION_MASTER_SPECIES
SOLUTION_SPECIES
PHASES
EXCHANGE_MASTER_SPECIES
EXCHANGE_SPECIES
SURFACE_MASTER_SPECIES
SURFACE_SPECIES
END

Reading input data for simulation 1.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 2.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 3.

SELECTED_OUTPUT
file C:\AQUACHEM\UNTIT4.pun
totals
molalities
activities
equilibrium_phases
saturation_indices
gases

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 4.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 5.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 6.

ANEXO 3.3.

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

```

-----
END
-----
End of simulation.
-----

-----
Reading input data for simulation 7.
-----

SOLUTION 29 10 SANTIUSTE DETRITICO Ca-Mg-HCO3-SO4 0029
units mmol/l
pH 8
pe 4
density 1
temp 14
redox pe
Ca 1.347305
Mg 1.069519
Na 1.087429
K 7.672635E-02
Cl 0.6487463
Alkalinity 3.163519 as HCO3
S 0.8120263
N(+5) 0.7256894

END
-----
Beginning of initial solution calculations.
-----

Initial solution 29. 10 SANTIUSTE DETRITICO Ca-Mg-HCO3-SO4
0029

-----Solution composition-----
-

Elements Molality Moles
Alkalinity 3.165e-03 3.165e-03
Ca 1.348e-03 1.348e-03
Cl 6.490e-04 6.490e-04
K 7.676e-05 7.676e-05
Mg 1.070e-03 1.070e-03
N(5) 7.260e-04 7.260e-04
Na 1.088e-03 1.088e-03
S 8.124e-04 8.124e-04

-----Description of solution-----
-

pH = 8.000
pe = 4.000
Activity of water = 1.000
Ionic strength = 8.654e-03
Mass of water (kg) = 1.000e+00
Total carbon (mol/kg) = 3.206e-03
Total CO2 (mol/kg) = 3.206e-03
Temperature (deg C) = 14.000
Electrical balance (eq) = -1.643e-04
Iterations = 7
Total H = 1.110155e+02
Total O = 5.552119e+01

-----Distribution of species-----
-

Log Log Log

```


OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

	Species	Molality	Activity	Molality	Activity	Gamma
C (4)	OH-	4.563e-07	4.141e-07	-6.341	-6.383	-0.042
	H+	1.088e-08	1.000e-08	-7.963	-8.000	-0.037
	H2O	5.551e+01	9.999e-01	0.000	0.000	0.000
		3.206e-03				
	HCO3-	3.047e-03	2.779e-03	-2.516	-2.556	-0.040
	CO2	7.416e-05	7.431e-05	-4.130	-4.129	0.001
	CaHCO3+	2.687e-05	2.451e-05	-4.571	-4.611	-0.040
	MgHCO3+	2.362e-05	2.148e-05	-4.627	-4.668	-0.041
	CO3-2	1.459e-05	1.010e-05	-4.836	-4.996	-0.160
	CaCO3	1.219e-05	1.221e-05	-4.914	-4.913	0.001
	MgCO3	5.559e-06	5.571e-06	-5.255	-5.254	0.001
	NaHCO3	1.539e-06	1.542e-06	-5.813	-5.812	0.001
	NaCO3-	1.146e-07	1.043e-07	-6.941	-6.982	-0.041
		1.348e-03				
Ca	Ca+2	1.237e-03	8.553e-04	-2.908	-3.068	-0.160
	CaSO4	7.188e-05	7.202e-05	-4.143	-4.143	0.001
	CaHCO3+	2.687e-05	2.451e-05	-4.571	-4.611	-0.040
	CaCO3	1.219e-05	1.221e-05	-4.914	-4.913	0.001
	CaOH+	1.561e-08	1.419e-08	-7.807	-7.848	-0.041
Cl		6.490e-04				
	Cl-	6.490e-04	5.893e-04	-3.188	-3.230	-0.042
H (0)		1.452e-27				
	H2	7.260e-28	7.275e-28	-27.139	-27.138	0.001
K		7.676e-05				
	K+	7.654e-05	6.949e-05	-4.116	-4.158	-0.042
	KSO4-	2.196e-07	1.997e-07	-6.658	-6.700	-0.041
	KOH	2.404e-11	2.409e-11	-10.619	-10.618	0.001
Mg		1.070e-03				
	Mg+2	9.846e-04	6.846e-04	-3.007	-3.165	-0.158
	MgSO4	5.604e-05	5.615e-05	-4.251	-4.251	0.001
	MgHCO3+	2.362e-05	2.148e-05	-4.627	-4.668	-0.041
	MgCO3	5.559e-06	5.571e-06	-5.255	-5.254	0.001
	MgOH+	9.745e-08	8.861e-08	-7.011	-7.053	-0.041
N (5)		7.260e-04				
	NO3-	7.260e-04	6.581e-04	-3.139	-3.182	-0.043
Na		1.088e-03				
	Na+	1.084e-03	9.865e-04	-2.965	-3.006	-0.041
	NaSO4-	2.375e-06	2.159e-06	-5.624	-5.666	-0.041
	NaHCO3	1.539e-06	1.542e-06	-5.813	-5.812	0.001
	NaCO3-	1.146e-07	1.043e-07	-6.941	-6.982	-0.041
	NaOH	6.504e-10	6.517e-10	-9.187	-9.186	0.001
O (0)		0.000e+00				
	O2	0.000e+00	0.000e+00	-41.866	-41.865	0.001
S (-2)		0.000e+00				
	HS-	0.000e+00	0.000e+00	-71.947	-71.989	-0.042
	H2S	0.000e+00	0.000e+00	-72.847	-72.847	0.001
	S-2	0.000e+00	0.000e+00	-77.085	-77.247	-0.162
S (6)		8.124e-04				
	SO4-2	6.818e-04	4.696e-04	-3.166	-3.328	-0.162
	CaSO4	7.188e-05	7.202e-05	-4.143	-4.143	0.001
	MgSO4	5.604e-05	5.615e-05	-4.251	-4.251	0.001
	NaSO4-	2.375e-06	2.159e-06	-5.624	-5.666	-0.041
	KSO4-	2.196e-07	1.997e-07	-6.658	-6.700	-0.041
	HSO4-	3.994e-10	3.632e-10	-9.399	-9.440	-0.041

-----Saturation indices-----

-

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.06	-6.40	-4.33	CaSO4
Aragonite	0.21	-8.06	-8.27	CaCO3
Calcite	0.36	-8.06	-8.43	CaCO3
CO2 (g)	-2.80	-21.00	-18.19	CO2
Dolomite	0.60	-16.22	-16.83	CaMg (CO3) 2
Gypsum	-1.81	-6.40	-4.59	CaSO4:2H2O

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

H2 (g)	-24.04	-24.00	0.04	H2
H2S (g)	-71.98	-115.33	-43.35	H2S
O2 (g)	-38.96	48.00	86.96	O2
Sulfur	-54.00	-91.33	-37.33	S

End of simulation.

Reading input data for simulation 8.

End of run.

22

```
-----
Reading data base.
-----

      SOLUTION_MASTER_SPECIES
      SOLUTION_SPECIES
      PHASES
      EXCHANGE_MASTER_SPECIES
      EXCHANGE_SPECIES
      SURFACE_MASTER_SPECIES
      SURFACE_SPECIES
      END
-----
Reading input data for simulation 1.
-----

      END
-----
End of simulation.
-----

-----
Reading input data for simulation 2.
-----

      END
-----
End of simulation.
-----

-----
Reading input data for simulation 3.
-----

      SELECTED_OUTPUT
      file C:\AQUACHEM\UNTIT4.pun
      totals
      molalities
      activities
      equilibrium_phases
      saturation_indices
      gases
      END
-----
End of simulation.
-----

-----
Reading input data for simulation 4.
-----

      END
-----
End of simulation.
-----

-----
Reading input data for simulation 5.
-----

      END
-----
End of simulation.
-----
```

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Reading input data for simulation 6.

END

End of simulation.

Reading input data for simulation 7.

SOLUTION 29 10 SANTIUSTE DETRITICO Ca-Mg-HCO3-SO4 0029
units mmol/l
pH 8
pe 4
density 1
temp 14
redox pe
Ca 1.347305
Mg 1.069519
Na 1.087429
K 7.672635E-02
Cl 0.6487463
Alkalinity 3.163519 as HCO3
S 0.8120263
N(+5) 0.7256894

END

Beginning of initial solution calculations.

Initial solution 29. 10 SANTIUSTE DETRITICO Ca-Mg-HCO3-SO4
0029

-----Solution composition-----
-

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.165e-03	3.165e-03
Ca	1.348e-03	1.348e-03
Cl	6.490e-04	6.490e-04
K	7.676e-05	7.676e-05
Mg	1.070e-03	1.070e-03
N(5)	7.260e-04	7.260e-04
Na	1.088e-03	1.088e-03
S	8.124e-04	8.124e-04

-----Description of solution-----
-

pH = 8.000
pe = 4.000
Activity of water = 1.000
Ionic strength = 8.654e-03
Mass of water (kg) = 1.000e+00
Total carbon (mol/kg) = 3.206e-03
Total CO2 (mol/kg) = 3.206e-03
Temperature (deg C) = 14.000
Electrical balance (eq) = -1.643e-04
Iterations = 7
Total H = 1.110155e+02
Total O = 5.552119e+01

-----Distribution of species-----
-

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

	Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma
C (4)	OH-	4.563e-07	4.141e-07	-6.341	-6.383	-0.042
	H+	1.088e-08	1.000e-08	-7.963	-8.000	-0.037
	H2O	5.551e+01	9.999e-01	0.000	0.000	0.000
		3.206e-03				
	HCO3-	3.047e-03	2.779e-03	-2.516	-2.556	-0.040
	CO2	7.416e-05	7.431e-05	-4.130	-4.129	0.001
	CaHCO3+	2.687e-05	2.451e-05	-4.571	-4.611	-0.040
	MgHCO3+	2.362e-05	2.148e-05	-4.627	-4.668	-0.041
	CO3-2	1.459e-05	1.010e-05	-4.836	-4.996	-0.160
	CaCO3	1.219e-05	1.221e-05	-4.914	-4.913	0.001
	MgCO3	5.559e-06	5.571e-06	-5.255	-5.254	0.001
	NaHCO3	1.539e-06	1.542e-06	-5.813	-5.812	0.001
Ca	NaCO3-	1.146e-07	1.043e-07	-6.941	-6.982	-0.041
		1.348e-03				
	Ca+2	1.237e-03	8.553e-04	-2.908	-3.068	-0.160
	CaSO4	7.188e-05	7.202e-05	-4.143	-4.143	0.001
	CaHCO3+	2.687e-05	2.451e-05	-4.571	-4.611	-0.040
	CaCO3	1.219e-05	1.221e-05	-4.914	-4.913	0.001
Cl	CaOH+	1.561e-08	1.419e-08	-7.807	-7.848	-0.041
		6.490e-04				
H (0)	Cl-	6.490e-04	5.893e-04	-3.188	-3.230	-0.042
		1.452e-27				
K	H2	7.260e-28	7.275e-28	-27.139	-27.138	0.001
		7.676e-05				
Mg	K+	7.654e-05	6.949e-05	-4.116	-4.158	-0.042
	KSO4-	2.196e-07	1.997e-07	-6.658	-6.700	-0.041
	KOH	2.404e-11	2.409e-11	-10.619	-10.618	0.001
N (5)		1.070e-03				
	Mg+2	9.846e-04	6.846e-04	-3.007	-3.165	-0.158
	MgSO4	5.604e-05	5.615e-05	-4.251	-4.251	0.001
	MgHCO3+	2.362e-05	2.148e-05	-4.627	-4.668	-0.041
	MgCO3	5.559e-06	5.571e-06	-5.255	-5.254	0.001
	MgOH+	9.745e-08	8.861e-08	-7.011	-7.053	-0.041
Na		7.260e-04				
	NO3-	7.260e-04	6.581e-04	-3.139	-3.182	-0.043
		1.088e-03				
	Na+	1.084e-03	9.865e-04	-2.965	-3.006	-0.041
	NaSO4-	2.375e-06	2.159e-06	-5.624	-5.666	-0.041
	NaHCO3	1.539e-06	1.542e-06	-5.813	-5.812	0.001
O (0)	NaCO3-	1.146e-07	1.043e-07	-6.941	-6.982	-0.041
	NaOH	6.504e-10	6.517e-10	-9.187	-9.186	0.001
S (-2)		0.000e+00				
	O2	0.000e+00	0.000e+00	-41.866	-41.865	0.001
S (6)		0.000e+00				
	HS-	0.000e+00	0.000e+00	-71.947	-71.989	-0.042
	H2S	0.000e+00	0.000e+00	-72.847	-72.847	0.001
	S-2	0.000e+00	0.000e+00	-77.085	-77.247	-0.162
		8.124e-04				
	SO4-2	6.818e-04	4.696e-04	-3.166	-3.328	-0.162
	CaSO4	7.188e-05	7.202e-05	-4.143	-4.143	0.001
	MgSO4	5.604e-05	5.615e-05	-4.251	-4.251	0.001
	NaSO4-	2.375e-06	2.159e-06	-5.624	-5.666	-0.041
	KSO4-	2.196e-07	1.997e-07	-6.658	-6.700	-0.041
	HSO4-	3.994e-10	3.632e-10	-9.399	-9.440	-0.041

-----Saturation indices-----
-

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.06	-6.40	-4.33	CaSO4
Aragonite	0.21	-8.06	-8.27	CaCO3
Calcite	0.36	-8.06	-8.43	CaCO3
CO2(g)	-2.80	-21.00	-18.19	CO2

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Dolomite	0.60	-16.22	-16.83	CaMg (CO ₃) ₂
Gypsum	-1.81	-6.40	-4.59	CaSO ₄ :2H ₂ O
H ₂ (g)	-24.04	-24.00	0.04	H ₂
H ₂ S(g)	-71.98	-115.33	-43.35	H ₂ S
O ₂ (g)	-38.96	48.00	86.96	O ₂
Sulfur	-54.00	-91.33	-37.33	S

End of simulation.

Reading input data for simulation 8.

```

SOLUTION 22  22          CUBETA SANTI CUATERNARIO  Na-HCO3          0021
(02)
      units mmol/l
      pH      9
      pe      4
      density      1
      temp    13.5
      redox    pe
      O(0)    0.13598
      Ca      9.980039E-02
      Mg      0.2879474
      Na      4.306221
      K       2.557545E-02
      Si      0.1664831
      Cl      0.8179844
      Alkalinity 3.495989 as HCO3
      S       0.2706755
      N(+5)   0.2741493

```

END

Beginning of initial solution calculations.

```

Initial solution 22.      22          CUBETA SANTI CUATERNARIO  Na-HCO3
0021 (02)

```

-----Solution composition-----
-

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	3.497e-03	3.497e-03
Ca	9.984e-05	9.984e-05
Cl	8.183e-04	8.183e-04
K	2.559e-05	2.559e-05
Mg	2.881e-04	2.881e-04
N(5)	2.743e-04	2.743e-04
Na	4.308e-03	4.308e-03
O(0)	1.360e-04	1.360e-04
S	2.708e-04	2.708e-04
Si	1.665e-04	1.665e-04

-----Description of solution-----
-

pH	=	9.000
pe	=	4.000
Activity of water	=	1.000
Ionic strength	=	5.775e-03
Mass of water (kg)	=	1.000e+00
Total carbon (mol/kg)	=	3.314e-03
Total CO ₂ (mol/kg)	=	3.314e-03
Temperature (deg C)	=	13.500

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Electrical balance (eq) = -2.219e-05
Iterations = 8
Total H = 1.110162e+02
Total O = 5.551886e+01

-----Redox couples-----
-

Redox couple	pe	Eh (volts)
O(-2)/O(0)	12.4693	0.7092

-----Distribution of species-----
-

	Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma
	OH-	4.301e-06	3.968e-06	-5.366	-5.401	-0.035
	H+	1.074e-09	1.000e-09	-8.969	-9.000	-0.031
	H2O	5.551e+01	9.998e-01	0.000	0.000	0.000
C (4)		3.314e-03				
	HCO3-	3.121e-03	2.889e-03	-2.506	-2.539	-0.034
	CO3-2	1.410e-04	1.036e-04	-3.851	-3.985	-0.134
	MgCO3	1.579e-05	1.581e-05	-4.802	-4.801	0.001
	CaCO3	9.232e-06	9.244e-06	-5.035	-5.034	0.001
	CO2	7.791e-06	7.801e-06	-5.108	-5.108	0.001
	MgHCO3+	6.734e-06	6.220e-06	-5.172	-5.206	-0.034
	NaHCO3	6.439e-06	6.448e-06	-5.191	-5.191	0.001
	NaCO3-	4.532e-06	4.186e-06	-5.344	-5.378	-0.034
	CaHCO3+	2.017e-06	1.867e-06	-5.695	-5.729	-0.034
Ca		9.984e-05				
	Ca+2	8.644e-05	6.345e-05	-4.063	-4.198	-0.134
	CaCO3	9.232e-06	9.244e-06	-5.035	-5.034	0.001
	CaSO4	2.141e-06	2.143e-06	-5.669	-5.669	0.001
	CaHCO3+	2.017e-06	1.867e-06	-5.695	-5.729	-0.034
	CaOH+	1.140e-08	1.053e-08	-7.943	-7.978	-0.034
Cl		8.183e-04				
	Cl-	8.183e-04	7.552e-04	-3.087	-3.122	-0.035
H (0)		1.455e-29				
	H2	7.274e-30	7.284e-30	-29.138	-29.138	0.001
K		2.559e-05				
	K+	2.556e-05	2.358e-05	-4.593	-4.627	-0.035
	KSO4-	2.938e-08	2.714e-08	-7.532	-7.566	-0.034
	KOH	8.165e-11	8.176e-11	-10.088	-10.087	0.001
Mg		2.881e-04				
	Mg+2	2.591e-04	1.909e-04	-3.587	-3.719	-0.133
	MgCO3	1.579e-05	1.581e-05	-4.802	-4.801	0.001
	MgHCO3+	6.734e-06	6.220e-06	-5.172	-5.206	-0.034
	MgSO4	6.218e-06	6.226e-06	-5.206	-5.206	0.001
	MgOH+	2.547e-07	2.353e-07	-6.594	-6.628	-0.034
N (5)		2.743e-04				
	NO3-	2.743e-04	2.528e-04	-3.562	-3.597	-0.035
Na		4.308e-03				
	Na+	4.293e-03	3.969e-03	-2.367	-2.401	-0.034
	NaHCO3	6.439e-06	6.448e-06	-5.191	-5.191	0.001
	NaCO3-	4.532e-06	4.186e-06	-5.344	-5.378	-0.034
	NaSO4-	3.779e-06	3.491e-06	-5.423	-5.457	-0.034
	NaOH	2.618e-08	2.622e-08	-7.582	-7.581	0.001
O (0)		1.360e-04				
	O2	6.802e-05	6.811e-05	-4.167	-4.167	0.001
S (-2)		0.000e+00				
	HS-	0.000e+00	0.000e+00	-81.269	-81.304	-0.035
	H2S	0.000e+00	0.000e+00	-83.155	-83.154	0.001
	S-2	0.000e+00	0.000e+00	-85.443	-85.578	-0.135
S (6)		2.708e-04				
	SO4-2	2.586e-04	1.893e-04	-3.587	-3.723	-0.135
	MgSO4	6.218e-06	6.226e-06	-5.206	-5.206	0.001

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

	NaSO4-	3.779e-06	3.491e-06	-5.423	-5.457	-0.034
	CaSO4	2.141e-06	2.143e-06	-5.669	-5.669	0.001
	KSO4-	2.938e-08	2.714e-08	-7.532	-7.566	-0.034
	HSO4-	1.570e-11	1.450e-11	-10.804	-10.839	-0.034
Si	1.665e-04					
	H4SiO4	1.509e-04	1.511e-04	-3.821	-3.821	0.001
	H3SiO4-	1.566e-05	1.447e-05	-4.805	-4.840	-0.034
	H2SiO4-2	6.060e-10	4.412e-10	-9.218	-9.355	-0.138

-----Saturation indices-----
-

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-3.59	-7.92	-4.33	CaSO4
Aragonite	0.09	-8.18	-8.27	CaCO3
Calcite	0.24	-8.18	-8.42	CaCO3
Chalcedony	-0.13	-3.82	-3.69	SiO2
Chrysotile	1.52	35.20	33.68	Mg3Si2O5(OH)4
CO2(g)	-3.79	-21.98	-18.20	CO2
Dolomite	0.93	-15.89	-16.81	CaMg(CO3)2
Gypsum	-3.33	-7.92	-4.59	CaSO4·2H2O
H2(g)	-26.04	-26.00	0.04	H2
H2S(g)	-82.29	-125.72	-43.43	H2S
O2(g)	-1.26	-4.17	-2.91	O2
Quartz	0.34	-3.82	-4.16	SiO2
Sepiolite	1.02	17.10	16.07	Mg2Si3O7·5OH·3H2O
Sepiolite(d)	-1.56	17.10	18.66	Mg2Si3O7·5OH·3H2O
SiO2(a)	-1.01	-3.82	-2.81	SiO2
Sulfur	-62.32	-99.72	-37.41	S
Talc	4.80	27.56	22.76	Mg3Si4O10(OH)2

End of simulation.

Reading input data for simulation 9.

End of run.

17

(08) SOLUTION 17 17 CUBETA SANTI CUATERNARIO Ca-Mg-HCO3 0016

```

units mmol/l
pH      8.1
pe       4
density      1
temp     10
redox    pe
O(0)    1.125352E-03
Ca       2.145709
Mg       2.097902
Na       1.739887
K        0.1278772
Si       0.6147069
Cl       1.607762
Alkalinity 6.753212 as HCO3
S        0.5725827
N(+5)    0.4676665

```

Beginning of initial solution calculations.

Initial solution 17. 17 CUBETA SANTI CUATERNARIO Ca-Mg-HCO3
0016 (08)

-----Solution composition-----
-

Elements	Molality	Moles
Alkalinity	6.758e-03	6.758e-03
Ca	2.147e-03	2.147e-03
Cl	1.609e-03	1.609e-03
K	1.280e-04	1.280e-04
Mg	2.099e-03	2.099e-03
N(5)	4.680e-04	4.680e-04
Na	1.741e-03	1.741e-03
O(0)	1.126e-06	1.126e-06
S	5.730e-04	5.730e-04
Si	6.152e-04	6.152e-04

-----Description of solution-----
-

```

pH = 8.100
pe = 4.000
Activity of water = 1.000
Ionic strength = 1.403e-02
Mass of water (kg) = 1.000e+00
Total carbon (mol/kg) = 6.783e-03
Total CO2 (mol/kg) = 6.783e-03
Temperature (deg C) = 10.000
Electrical balance (eq) = 3.815e-04
Iterations = 7
Total H = 1.110214e+02
Total O = 5.553259e+01

```

-----Redox couples-----
-

Redox couple	pe	Eh (volts)
O(-2)/O(0)	13.1665	0.7397

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

-----Distribution of species-----

-

	Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma
C (4)	OH-	4.149e-07	3.682e-07	-6.382	-6.434	-0.052
	H+	8.785e-09	7.943e-09	-8.056	-8.100	-0.044
	H2O	5.551e+01	9.997e-01	0.000	0.000	0.000
		6.783e-03				
	HCO3-	6.384e-03	5.706e-03	-2.195	-2.244	-0.049
	CO2	1.313e-04	1.318e-04	-3.882	-3.880	0.001
	MgHCO3+	8.941e-05	7.958e-05	-4.049	-4.099	-0.051
	CaHCO3+	7.456e-05	6.664e-05	-4.127	-4.176	-0.049
	CaCO3	4.000e-05	4.012e-05	-4.398	-4.397	0.001
	CO3-2	3.660e-05	2.336e-05	-4.436	-4.632	-0.195
Ca	MgCO3	2.193e-05	2.200e-05	-4.659	-4.657	0.001
	NaHCO3	4.942e-06	4.958e-06	-5.306	-5.305	0.001
	NaCO3-	3.404e-07	3.030e-07	-6.468	-6.519	-0.051
		2.147e-03				
	Ca+2	1.971e-03	1.257e-03	-2.705	-2.901	-0.195
	CaHCO3+	7.456e-05	6.664e-05	-4.127	-4.176	-0.049
	CaSO4	6.193e-05	6.213e-05	-4.208	-4.207	0.001
	CaCO3	4.000e-05	4.012e-05	-4.398	-4.397	0.001
	CaOH+	2.950e-08	2.626e-08	-7.530	-7.581	-0.051
		1.609e-03				
Cl1	Cl-	1.609e-03	1.428e-03	-2.793	-2.845	-0.052
H (0)		9.246e-28				
	H2	4.623e-28	4.638e-28	-27.335	-27.334	0.001
K		1.280e-04				
	K+	1.278e-04	1.134e-04	-3.894	-3.945	-0.052
	KSO4-	2.118e-07	1.885e-07	-6.674	-6.725	-0.051
	KOH	4.934e-11	4.950e-11	-10.307	-10.305	0.001
Mg		2.099e-03				
	Mg+2	1.932e-03	1.243e-03	-2.714	-2.906	-0.192
	MgHCO3+	8.941e-05	7.958e-05	-4.049	-4.099	-0.051
	MgSO4	5.551e-05	5.569e-05	-4.256	-4.254	0.001
	MgCO3	2.193e-05	2.200e-05	-4.659	-4.657	0.001
	MgOH+	1.533e-07	1.364e-07	-6.814	-6.865	-0.051
N (5)		4.680e-04				
	NO3-	4.680e-04	4.144e-04	-3.330	-3.383	-0.053
Na		1.741e-03				
	Na+	1.734e-03	1.545e-03	-2.761	-2.811	-0.050
	NaHCO3	4.942e-06	4.958e-06	-5.306	-5.305	0.001
	NaSO4-	2.260e-06	2.011e-06	-5.646	-5.697	-0.051
	NaCO3-	3.404e-07	3.030e-07	-6.468	-6.519	-0.051
	NaOH	1.281e-09	1.285e-09	-8.893	-8.891	0.001
O (0)		1.126e-06				
	O2	5.631e-07	5.649e-07	-6.249	-6.248	0.001
S (-2)		0.000e+00				
	HS-	0.000e+00	0.000e+00	-72.404	-72.456	-0.052
	H2S	0.000e+00	0.000e+00	-73.358	-73.356	0.001
	S-2	0.000e+00	0.000e+00	-77.547	-77.744	-0.198
S (6)		5.730e-04				
	SO4-2	4.531e-04	2.871e-04	-3.344	-3.542	-0.198
	CaSO4	6.193e-05	6.213e-05	-4.208	-4.207	0.001
	MgSO4	5.551e-05	5.569e-05	-4.256	-4.254	0.001
	NaSO4-	2.260e-06	2.011e-06	-5.646	-5.697	-0.051
	KSO4-	2.118e-07	1.885e-07	-6.674	-6.725	-0.051
	HSO4-	1.835e-10	1.633e-10	-9.736	-9.787	-0.051
		6.152e-04				
Si	H4SiO4	6.080e-04	6.100e-04	-3.216	-3.215	0.001
	H3SiO4-	7.146e-06	6.360e-06	-5.146	-5.197	-0.051
	H2SiO4-2	2.981e-11	1.871e-11	-10.526	-10.728	-0.202

-----Saturation indices-----

-

OBJETIVO BUEN ESTADO DE LAS AGUAS (BEDLA)
ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA INTERACCIÓN AGUA-SUELO

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anhydrite	-2.11	-6.44	-4.34	CaSO ₄
Aragonite	0.72	-7.53	-8.26	CaCO ₃
Calcite	0.88	-7.53	-8.41	CaCO ₃
Chalcedony	0.52	-3.21	-3.73	SiO ₂
Chrysotile	-0.70	33.45	34.16	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
CO ₂ (g)	-2.61	-20.83	-18.22	CO ₂
Dolomite	1.65	-15.07	-16.72	CaMg(CO ₃) ₂
Gypsum	-1.85	-6.44	-4.59	CaSO ₄ ·2H ₂ O
H ₂ (g)	-24.25	-24.20	0.05	H ₂
H ₂ S(g)	-72.54	-116.54	-44.00	H ₂ S
O ₂ (g)	-3.36	-6.25	-2.89	O ₂
Quartz	1.00	-3.21	-4.21	SiO ₂
Sepiolite	0.77	16.94	16.18	Mg ₂ Si ₃ O ₇ ·5OH·3H ₂ O
Sepiolite(d)	-1.72	16.94	18.66	Mg ₂ Si ₃ O ₇ ·5OH·3H ₂ O
SiO ₂ (a)	-0.37	-3.21	-2.84	SiO ₂
Sulfur	-54.41	-92.34	-37.93	S
Talc	3.83	27.03	23.20	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂

End of simulation.

Reading input data for simulation 9.

End of run.

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.1.- INVENTARIO EXHAUSTIVO DE HUMEDALES

ANEXO 4.1.1. Inventario tabulado de humedales en la zona de estudio

ANEXO 4.1.2. Resumen gráfico



MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

Nº	TIPO	NOMBRE	LOCALIDAD	FECHA	X	Y	Z	SUSTRATO	AGU	C µS/cm	pH	SAL	TSD	fecha	VEG_HIDR	DRENAJE	CULTIVOS	EST_CONS
1	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363023	4574355	750,5	SALINO	N						N	S	N	1
2	AZUL	Laguna de las Eras	AGUASAL	31-07-03	363298	4574254	750,6	SALINO	N						N	N	N	4
3	AZUL		AGUASAL	31-07-03	363272	4574192	750,6	SALINO	N						N	N	LABRADO	3
4	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363055	4574177	750,1	SALINO	N						N	N	N	1
5	AZUL		AGUASAL	31-07-03	363178	4574046	750,3	SALINO	N						N	N	S	5
6	AZUL	Juncarral	AGUASAL	31-07-03	362876	4574044	749,0	SALINO	S						S	N	N	5
7	AZUL	Bodón de la Liebre	AGUASAL	31-07-03	363580	4571974	754,5	SALINO-TUR	N						S	N	S GIRASOL	4
8	AZUL	Bodón de la Crijota	AGUASAL	31-07-03	363181	4571973	753,6	Q-ARENOSO	N						S	S	S	4
9	AZUL		AGUASAL	31-07-03	363308	4571934	753,9	ARENOSO	N						S	N	N	3
10	AZUL		AGUASAL	31-07-03	363648	4571809	754,4	Q-ARENOSO	N						S	S	S	3
11	AZUL		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364202	4571656	755,8	ARENOSO	N						S	S	N	3
12	AZUL	Bodón Guarrero	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364467	4571575	757,0	SALINO	S	12000	9,0			jun-99	S SECA	S	N	4
13	ROJO	El Horno	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	366213	4570738	761,1	Q-ARENOSO	N						N	N	N	1
14	ROJO		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	366747	4570506	762,4	ARENOSO	N						N	N	N	1
15	AZUL	Bodón de la Vega	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	366407	4570320	762,5	SALINO	N						S	N	N	4
16	ROJO	Laguna Agua Caballo	VILLEGUILLO	31-07-03	367496	4570188	764,7	Q-ARENOSO	N						N	N	N	1
17	AZUL	La Cárcaba	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365458	4570158	762,6	Q-ARENOSO	S	1822	8,74	3,6	913	jul-03	S	N	S	4
18	NARANJA		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365095	4570039	772,2	Q-ARENOSO-SALINO	N						N	S	N	2
19	AZUL	Los Majuelos	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364390	4570049	778,2	Q-ARENOSO	S	13040	9,01			oct-03	S	N	N	5
20	ROJO		VILLEGUILLO	31-07-03	367740	4570024	765,3	SALINO	N						N	N	S	1
21	ROJO	La Cochina	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365783	4570020	763,8	Q-ARENOSO	N						N	N	S	1
22	NARANJA	Ermita Llano de Olmedo	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364825	4569739	779,7	Q-ARENOSO	N						N	N	N	2
23	AZUL	Cárcava Grande	AGUASAL	31-07-03	361753	4570906	758,0	SALINO	S	13180	9,73			oct-03	S	N	N	4
24	NARANJA		AGUASAL	31-07-03	361573	4570906	758,0	SALINO	N						N	S	S	2
25	AMARILLO		AGUASAL	31-07-03	361410	4571053	759,0	SALINO	N						S	S	S	2
26	AZUL		AGUASAL	31-07-03	362997	4571729	759,0	SALINO	N						N	S	S	3
27	AZUL		AGUASAL	31-07-03	361671	4570562	759,0	SALINO	S	1130	7,86			oct-03	S	N	S GIRASOL	4
28	AZUL	Cárcava Chica	AGUASAL	06-08-03	361733	4570619	759,0	SALINO	S	3900	9,23			oct-03	S	N	S	4
29	AZUL	El Medianero	VILLEGUILLO	06-08-03	366739	4569680	764,6	SALINO	N						N	S	S	4
30	AMARILLO	Las Dehesillas	VILLEGUILLO	06-08-03	368349	4569105	767,6	Q-ARENOSO-SALINO	N						N	S	S	1
31	NARANJA		VILLEGUILLO	06-08-03	367194	4569144	767,7	SALINO	N						N	N	S	3
32	AMARILLO	El Arenero	VILLEGUILLO	06-08-03	367129	4568786	776,0	ARENOSO	N						N	N	N	3
33	NARANJA		VILLEGUILLO	06-08-03	366283	4568485	772,0	SALINO	N						S	N	S	2
34	ROJO		VILLEGUILLO	06-08-03	367714	4568197	769,8	ARENOSO	N						S	S	S	1
35	AMARILLO		VILLEGUILLO	06-08-03	366335	4568177	768,5	SALINO	N						N	S	S	1
36	NARANJA	Bodón Redondo	VILLEGUILLO	06-08-03	369045	4567899	770,7	ARENOSO	N						N	N	S	2
37	NARANJA		VILLEGUILLO	06-08-03	369611	4567868	771,5	ARENOSO	N						N	N	N	1
38	AZUL	Laguna de Valdeperillán	LLANO DE OLMEDO	06-08-03	364791	4567848	762,8	SALINO	N						S	N	S	3
39	AMARILLO		VILLEGUILLO	06-08-03	365917	4567840	768,3	SALINO	N						S	S	S	3
40	AZUL	Laguna de Caballo Alba	VILLEGUILLO	06-08-03	365529	4567306	768,7	SALINO	N						S	S	S	3
41	AMARILLO		VILLEGUILLO	06-08-03	367367	4566909	788,3	SALINO	N						N	N	S	2
42	AMARILLO		VILLEGUILLO	06-08-03	366217	4566602	772,9	SALINO	N						S	S	S	2
43	AZUL		FUENTE-OLMEDO	06-08-03	364150	4566613	774,6	SALINO	N						S	S	S	3
44	AMARILLO	Los Pozuelos	FUENTE DE SANTA CRUZ	06-08-03	365167	4566375	772,4	SALINO	N						S	S	S	2
45	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367263	4565494	794,9	SALINO	S	1298	8,11	2,5	650	ago-03	S	N	S	3
46	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367272	4565455	794,8	SALINO	S	2040	8,1			jun-99	S	N	S	3
47	AMARILLO		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	366162	4565362	775,4	SALINO	N						N	S	S	2
48	AMARILLO		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367390	4565180	795,7	SALINO	N						S	S	S	2
49	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367354	4565070	795,6	SALINO	S	2036	8,08	4,0	1016	ago-03	S	S	N	4
50	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367451	4564778	797,0	SALINO	N						S	S	S	3
51	AZUL		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367525	4564520	798,2	SALINO	N						S	S	S	3
52	ROJO		COCA	06-08-03	369709	4563554	783,0	ARENOSO	N						N	S	N	1
53	NARANJA	Laguna de Valderuedas	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367332	4563161	799,0	SALINO	N						S	S	S	2
54	ROJO		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	368141	4563197	802,1	ARENOSO	N						N	S	S	1
55	ROJO		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367991	4563036	803,8	ARENOSO	N						N	S	S	1
56	AZUL	Laguna de la Iglesia	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	368570	4562726	786,9	SALINA	S/N						S	S	S	4
57	AZUL	Laguna de las Eras	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367434	4562545	798,1	SALINA	S	23660	9,1	46,2	11,83	ago-03	S	N	S	5
58	NARANJA		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367601	4561954	808,2	SALINA	N						S	S	S	3
59	NARANJA		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	366912	4561831	807,3	ARENOSO	N						S	S	S	2

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

60	AMARILLO	El Bodón	BERNUY DE COCA	06-08-03	365036	4561291	811,3	SALINA	N						S	S	S	2
61	ROJO		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367182	4561024	817,9	ARENOSO	N						N	N	S	1
62	AZUL	Fuente Miñor	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367446	4560584	812,8	SALINA	N						S	N	S	3
63	AMARILLO		BERNUY DE COCA	06-08-03	365378	4560000	820,3	ARENOSO	N						S	S	S	2
64	AMARILLO		BERNUY DE COCA	06-08-03	365240	4559907	824,5	ARENOSO	N						S	S	S	2
65	AMARILLO		SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	368301	4559261	801,7	ARENOSO	N						S	S	S	3
66	AZUL	Bodón de la Hiruela	SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	368426	4559078	802,6	SALINA	S	3080	8,62	6,1	11,52	ago-03	S	N	S	4
67	AZUL	Humedales de Bernuy	SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	366880	4558862	815,4	SALINA	S	2368	8,85	4,6	11,83	ago-03	S	N	N	5
68	ROJO		SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	367351	4558400	824,5	SALINA	N						S	S	S	2
69	ROJO		AGUASAL	31-07-03	362806	4572371	757,0	SALINA	N						N			
70	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363358	4572241	757,0	SALINA	N						N			
71	ROJO		AGUASAL	31-07-03	362936	4571963	757,0	SALINA	N						N			
72	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363651	4571992	757,0	SALINA	N						N			
73	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363152	4571742	757,0	SALINA	N						N			
74	ROJO		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364021	4571449	762,0	SALINA	N						N			
75	ROJO		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364366	4571257	763,0	SALINA	N						N			
76	ROJO		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364558	4571080	762,0	SALINA	N						N			
77	ROJO		AGUASAL	31-07-03	364909	4573024	750,0	SALINA	N						N			
78	ROJO		AGUASAL	31-07-03	361227	4571651	750,0	SALINA	N						N			
79	ROJO		AGUASAL	31-07-03	361280	4571161	750,0	SALINA	N						N			
80	ROJO		AGUASAL	31-07-03	361083	4570830	750,0	SALINA	N						N			
81	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363426	4574444	750,0	SALINA	N						N			
82	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363502	4574420	750,0	SALINA	N						N			
83	ROJO		AGUASAL	31-07-03	363776	4574166	750,0	SALINA	N						N			

estado conservación

- 5 agua- se puede mejorar
- 4 sin agua. Se puede recuperar. Sin cultivos alrededor
- 3 sin agua. Afectada. Con cultivos alrededor
- 2 Sin agua. Afectada sustancialmente. Roturada, drenada, cultivada
- 1 Sin agua. Afectada sustancialmente. Cambio de uso.

funcionamiento

humedal hidrodependiente

humedal asociado a la red de escorrentía superficial NO HIDRODEPENDIENTE/endorreico

humedal fuertemente degradado de difícil recuperación

humedal indicial desaparecido. Encuestas, etc.

OTROS
CUBIERTO POR ESTIÉRCOL
SUELO SALINO.
NO VEGETACION
LABRADO
RODEADO CULTIVOS
GARZA Y ANATIDAS
CBM
CERCADO POR CULTIVOS. Gramíneas e hidrófilas.
CBM
DISECCIONADO POR CAMINO
PRESENCIA VEGETACION NITRÓFILA
MUESTRA SUELO. Th 22°C, Ta 30°C.
CUBIERTO ESCOMBROS. HUMEDAL-VERTEDERO
POSIBLE HUMEDAL RELÍCTICO
CBM. VEG HIDROFILA Y NITRÓFILA. TURBAS
POSIBLE HUMEDAL RELÍCTICO
PRESENCIA FAUNA. LAMINA PERMANENTE.
HUMEDAL JUNTO A POBLACIÓN. CONSERVA TOPOGRAFÍA. CIGUEÑAS
LAMINA AGUA PERMANENTE
POSIBLE HUMEDAL RELÍCTICO. ESCORRENTÍA SUPERFICI
HUMEDAL RELÍCTICO DUDOSO
HUMEDAL JUNTO A POBLACIÓN.
RODEADO CARRETERAS
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
ABUNDANTES RUMEX CONGLOMERATA. TURBA
DRENAJE DESDE CIERTO NIVEL. JUNTO ESTACIÓN DE ÁR
DRENAJE DESDE CIERTO NIVEL
CONSERVA MORFOLOGÍA CBM
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
CONSERVA MORFOLOGÍA CBM. RECUPERABLE.RODEADO CULTIVOS
ANTIGUO ARENERO
INTERCALADO EN CULTIVO DE GIRASOL
JUNTO CASCO URBANO. ESCOMBRERA
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
CONSERVA MORFOLOGÍA CBM. VEG NITROFILA Y CULTIVOS. ROTURADO
EN PINAR EN REPOBLACIÓN.
ATRAVESADO LINEA ALTA TENSIÓN.
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
ATRAVESADO LINEA ALTA TENSIÓN. FIGURA DE PROTECCIÓN.
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL. ES UNA CONTINUACIÓN DE LA LAGUNA ALBA
SONDEOS PERFORADOS EN EL CUENCO.
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL. VEGETACIÓN NITRÓFILA
FLUJO ASCENDENTE. PERFORADOS POZOS EN CUENCO DEL HUMEDAL
FLUJO ASCENDENTE. PERFORADOS POZOS EN CUENCO DEL HUMEDAL. OX DISUELTO = 4.2 PPM
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL. GRAMÍNEAS. SUSTRATO GRIS
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
FLUJO ASCENDENTE. NUCLEO URBANO CIRUELOS
FLUJO ASCENDENTE. CBM. CHOPOS, NITROFILAS
FLUJO ASCENDENTE. CBM. CHOPOS, NITROFILAS
INDICIOS ANTIGUO HUMEDAL. ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
ASOCIADO A LA LAGUNA DE LAS ERAS
INDICIOS ANTIGUO HUMEDAL. LABRADO
INDICIOS ANTIGUO HUMEDAL. LABRADO
LAMINA AGUA OCASIONAL. FIGURA DE PROTECCIÓN.
FIGURA DE PROTECCIÓN.
CBM.
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
POZO DEPOSITO EXCAVADO. INDICIOS HUMEDAL PREVIO
NITROFILAS, GRAMÍNEAS, HIDROFILAS SALINAS
MANANTIAL-ABREVADERO. ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
ASOCIADO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL
CBM. EN LINEAMIENTO REZUMES VOLTOYA
DESAGUA POR ARROYO
RECIENTEMENTE DRENADO.
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS
HUMEDADES RELÍCTICOS DUDOSOS



hum-01.jpg



hum-02-laguna-Eras-Aguasal.jpg



hum-03.jpg



hum-04.jpg



hum-05.jpg



hum-06-Juncarral.jpg



hum-07-Liebre.jpg



hum-08-Crijota.jpg



hum-09.jpg



hum-10.jpg



hum-11-drenaje.jpg



hum-12-Guarrero.jpg



hum-13-El Horno.jpg



hum-14.jpg



hum-15-de la Vega.jpg



hum-16--Agua Caballo.jpg



hum-17-Cárcaba.jpg



hum-18.jpg



hum-19-Los Majuelos.jpg



hum-20-.jpg



hum-21-La-Cochina.jpg



hum-22-Ermita LLano de Olmedo.jpg



hum-23-Carcava Grande.jpg



hum-24-drenaje.jpg



hum-25.jpg



hum-26.jpg



hum-27.jpg



hum-28-Carcava Chica.jpg



hum-29.jpg



hum-30-Dehesillas.jpg



hum-31.jpg



hum-32.jpg



hum-33-Arenero.jpg



hum-34.jpg



hum-35.jpg



hum-36-Redondo.jpg



hum-37.jpg



hum-38-Valdeperillan.jpg



hum-39.jpg



hum-40-Caballo Alba.jpg



hum-41.jpg



hum-42.jpg



hum-43.jpg



hum-44-Pozuelos.jpg



hum-45 y 46.jpg



hum-45.jpg



hum-47.jpg



hum-48.jpg



hum-49.jpg



hum-50.jpg



hum-51.jpg



hum-52.jpg



hum-53-Valderuedas.jpg



hum-55-indicial.jpg



hum-56-Iglesia.jpg



hum-57-Eras.jpg



hum-58.jpg



hum-59.jpg



hum-60.jpg



hum-61.jpg



hum-62-Fuente Miñor.jpg



hum-63.jpg



hum-64.jpg



hum-65.jpg



hum-66-Hiruela.jpg



hum-67-Bernuy.jpg



hum-69.jpg

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS HUMEDALES

ANEXO 4.2.1. Tabla paramétrica general

ANEXO 4.2.2. Fotografías aéreas de los humedales y zona de influencia



INVENTARIO DE HUMEDALES
CARACTERIZACIÓN

Nº	TIPO	EST. CONS	NOMBRE	LOCALIDAD	FECHA	COORDENADAS UTM			MORFOMETRIA DEL CUENCO				PROF. M	MORFOMETRIA DE LA ZONA DE INFLUENCIA				
						X	Y	Z	AREA (m2)	PERIM (m2)	L, MÁX	A, MÁX		AREA (m2)	PERIM (m)	L, MÁX	A, MÁX	ESCALA
1	ROJO	1		AGUASAL	31-07-03	363023	4574355	750,5						1223	148	58,6	30,8	N
2	AZUL	4	Laguna de las Eras	AGUASAL	31-07-03	363298	4574254	750,6	680	315	25,0	20,0						N
3	AZUL	3		AGUASAL	31-07-03	363272	4574192	750,6	746	104	33,0	33,0						N
4	ROJO	1		AGUASAL	31-07-03	363055	4574177	750,1						423	77	27,6	18,9	N
5	AZUL	5		AGUASAL	31-07-03	363178	4574046	750,3	557	88								N
6	AZUL	5	Juncarral	AGUASAL	31-07-03	362876	4574044	749,0	745	125	49,7	20,8	35					N
7	AZUL	4	Bodón de la Liebre	AGUASAL	31-09-03	363580	4571974	754,5	380	77	27,5	20,4						N
8	AZUL	4	Bodón de la Crijota	AGUASAL	31-07-03	363181	4571973	753,6	675	300	15,0	12,0						N
9	AZUL	3		AGUASAL	31-07-03	363308	4571934	753,9										N
10	AZUL	3		AGUASAL	31-07-03	363648	4571809	754,4	2836	247	77,7	63,3						N
11	AZUL	3		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364202	4571656	755,8	358	70	24,2	19,0						N
12	AZUL	4	Bodón Guarrero	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364467	4571575	757,0	1619	149	49,8	47,0	0					N
13	ROJO	1	El Horno	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	366213	4570738	761,1										N
14	ROJO	1		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	366747	4570506	762,4										N
15	AZUL	4	Bodón de la Vega	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	366407	4570320	762,5	2265	234	84,1	38,4						N
16	ROJO	1	AGUA CABALLO	VILLEGUILLO	31-07-03	367496	4570188	764,7										N
17	AZUL	4	La Cárcaba	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365458	4570158	762,6	16837	565	229,4	112,9	48					N
18	NARANJA	2		LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365095	4570039	772,2	1891	174						67,9	39,4	N
19	AZUL	5	Los Majuelos	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364390	4570049	778,2	4610	310	110,0	75,4	22					N
20	ROJO	1		VILLEGUILLO	31-07-03	367740	4570024	765,3						8772	376	113,8	103,6	N
21	ROJO	1	La Cochina	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	365783	4570020	763,8						89759	1766	476,5	282,2	N
22	NARANJA	2	Ermita Llano de Olmedo	LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364825	4569739	779,7	2438	216						79,7	40,2	N
23	AZUL	4	CARCAVA GRANDE	AGUASAL	31-07-03	361753	4570906	758,0	3638	276	89,4	40,3	55					N
24	NARANJA	2		AGUASAL	31-07-03	361573	4570906	758,0	1400	159						62,0	31,4	N
25	AMARILLO	2		AGUASAL	31-07-03	361410	4571053	759,0										N
26	AZUL	3		AGUASAL	31-07-03	362997	4571729	759,0	675	310	19,0	15,0						N
27	AZUL	4		AGUASAL	31-07-03	361671	4570562	759,0	1404	170	67,1	34,8	15					N
28	AZUL	4	CARCAVA CHICA	AGUASAL	06-08-03	361733	4570619	759,0	4463	331	121,4	53,5	18					N
29	AZUL	4	El medianero	VILLEGUILLO	06-08-03	366739	4569680	764,6	87	34	11,4	9,9						N
30	AMARILLO	1	Las Dehesillas	VILLEGUILLO	06-08-03	368349	4569105	767,6	650	300	17,0	16,0						N
31	NARANJA	3		VILLEGUILLO	06-08-03	367194	4569144	767,7	161	57						24,8	9,4	N
32	AMARILLO	3	EL ARENERO	VILLEGUILLO	06-08-03	367129	4568786	776,0	1238	206						73,6	27,0	N
33	NARANJA	2		VILLEGUILLO	06-08-03	366283	4568485	772,0										N
34	ROJO	1		VILLEGUILLO	06-08-03	367714	4568197	769,8						6308	410	185,4	50,9	N
35	AMARILLO	1		VILLEGUILLO	06-08-03	366335	4568177	768,5	549	86						30,7	23,2	N
36	NARANJA	2	BODON REDONDO	VILLEGUILLO	06-08-03	369045	4567899	770,7	605	124						47,5	22,9	N
37	NARANJA	1		VILLEGUILLO	06-08-03	369611	4567868	771,5	7067	402						149,6	67,2	N
38	AZUL	3	LAGUNA DE VALDEPERILLÁN	LLANO DE OLMEDO	06-08-03	364791	4567848	762,8	246601	3268	1220,4	335,8						N
39	AMARILLO	3		VILLEGUILLO	06-08-03	365917	4567840	768,3	30678	995						347,8	127,6	N
40	AZUL	3	LAGUNA DE CABALLO ALBA	VILLEGUILLO	06-08-03	365529	4567306	768,7	197200	2139	555,1	552,7						N
41	AMARILLO	2		VILLEGUILLO	06-08-03	367367	4566909	788,3	3763	261						97,9	53,9	N
42	AMARILLO	2		VILLEGUILLO	06-08-03	366217	4566602	772,9	59331	2281						942,9	115,1	N
43	AZUL	3		FUENTE-OLMEDO	06-08-03	364150	4566613	774,6	56112	910	311,9	300,7						N
44	AMARILLO	2	LOS POZUELOS	FUENTE DE SANTA CRUZ	06-08-03	365167	4566375	772,4	79008	1407						383,8	249,1	N
45	AZUL	3		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367263	4565494	794,9	2392	206	78,6	37,4	22					N
46	AZUL	3		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367272	4565455	794,8					20					N
47	AMARILLO	2		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	366162	4565362	775,4	149115	3535						899,6	289,9	N
48	AMARILLO	2		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367390	4565180	795,7	8331	476						204,4	55,8	N
49	AZUL	4		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367354	4565070	795,6	2250	220	69,1	46,2	18					N
50	AZUL	3		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367451	4564778	797,0	5029	341	98,4	92,2						N
51	AZUL	3		CIRUELOS DE COCA	06-08-03	367525	4564520	798,2	10750	551	179,5	78,8						N
52	ROJO	1		COCA	06-08-03	369709	4563554	783,0						3856	278	111,8	49,6	N
53	NARANJA	2	LAGUNA DE VALDERUEDAS	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367332	4563161	799,0	45185	1382						637,4	143,9	N
54	ROJO	1		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	368141	4563197	802,1										N
55	ROJO	1		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367991	4563036	803,8										N
56	AZUL	4	LAGUNA DE LA IGLESIA	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	368570	4562726	786,9	79439	1209	482,6	227,5	0					N
57	AZUL	5	Laguna de las Eras	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367434	4562545	798,1	51562	1149	468,9	164,9	60					N

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

58	NARANJA	3		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367601	4561954	808,2	3123	264							98,5	59,2	N
59	NARANJA	2		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	366912	4561831	807,3	158	49							15,7	12,2	N
60	AMARILLO	2	EL BODO	BERNUY DE COCA	06-08-03	365036	4561291	811,3	358	77							30,6	19,27	N
61	ROJO	1		VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367182	4561024	817,9							279	60	19,6	18,1	N
62	AZUL	3	FUENTE MIÑOR	VILLAGONZALO DE COCA	06-08-03	367446	4560584	812,8	62394	1334	559,8	169,1							N
63	AMARILLO	2		BERNUY DE COCA	06-08-03	365378	4560000	820,3	178	49							14,2	14,8	N
64	AMARILLO	2		BERNUY DE COCA	06-08-03	365240	4559907	824,5	7334	489							226,5	58,5	N
65	AMARILLO	3		SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	368301	4559261	801,7	382	71							24,0	20,4	N
66	AZUL	4	BODÓN DE LA HIRUELA	SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	368426	4559078	802,6	2172	184	66,2	39,5	40						N
67	AZUL	5	HUMEDALES DE BERNUY	SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	366880	4558862	815,4	23044	600	234,1	67,6	50	3442	271				N
68	ROJO	2		SANTIUSTE DE SAN J & B	06-08-03	367351	4558400	824,5									110,1	60,2	N
69	ROJO			AGUASAL	31-07-03	362806	4572371	757,0											N
70	ROJO			AGUASAL	31-07-03	363358	4572241	757,0											N
71	ROJO			AGUASAL	31-07-03	362936	4571963	757,0											N
72	ROJO			AGUASAL	31-07-03	363651	4571992	757,0											N
73	ROJO			AGUASAL	31-07-03	363152	4571742	757,0											N
74	ROJO			LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364021	4571449	762,0											N
75	ROJO			LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364366	4571257	763,0											N
76	ROJO			LLANO DE OLMEDO	31-07-03	364558	4571080	762,0											N
77	ROJO			AGUASAL	31-07-03	364909	4573024	750,0											N
78	ROJO			AGUASAL	31-07-03	361227	4571651	750,0											N
79	ROJO			AGUASAL	31-07-03	361280	4571161	750,0											N
80	ROJO			AGUASAL	31-07-03	361083	4570830	750,0											N
81	ROJO			AGUASAL	31-07-03	363426	4574444	750,0											N
82	ROJO			AGUASAL	31-07-03	363502	4574420	750,0											N
83	ROJO			AGUASAL	31-07-03	363776	4574166	750,0											N

Estado conservación

- 5 agua- se puede mejorar
- 4 sin agua. Se puede recuperar. Sin cultivos alrededor
- 3 sin agua. Afectada. Con cultivos alrededor
- 2 Sin agua. Afectada sustancialmente. Roturada, drenada, cultivada
- 1 Sin agua. Afectada sustancialmente. Cambio de uso.

Funcionamiento

- humedal hidrodependiente
- humedal asociado a la red de escorrentía superficial NO HIDRODEPENDIENTE/endorreico
- humedal fuertemente degradado de difícil recuperación
- humedal indicial desaparecido. Encuestas, etc.

- a ENP JCL, Rey Benayas, 1990, Montes, 1995
- b r Benayas, 1990
- c ENP JCL, Rey Benayas, 1990

BIBL
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
a
N
N
N
b
N
N
N
N
N
N
N
N
b
N
N
c
c

N
N
b
N
b
N
N
N
N
b
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N
N



morf-01-esc-1000.jpg



morf-02y03-esc-1000.jpg



morf-04-esc-1000.jpg



morf-05-esc-1000.jpg



morf-06-esc-1000.jpg



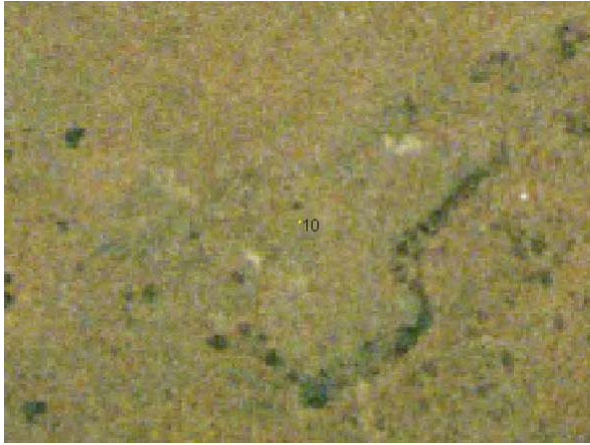
morf-07-esc-1000.jpg



morf-08-esc-1000.jpg



morf-09-esc-1000.jpg



morf-10-esc-1000.jpg



morf-11-esc-1000.jpg



morf-12-esc-1000.jpg



morf-13-esc-1000.jpg



morf-14-16-20-29-esc10000.jpg



morf-14-esc-1500.jpg



morf-15-esc-1500.jpg



morf-17a22-esc10000.jpg



morf-17-esc-2500.jpg



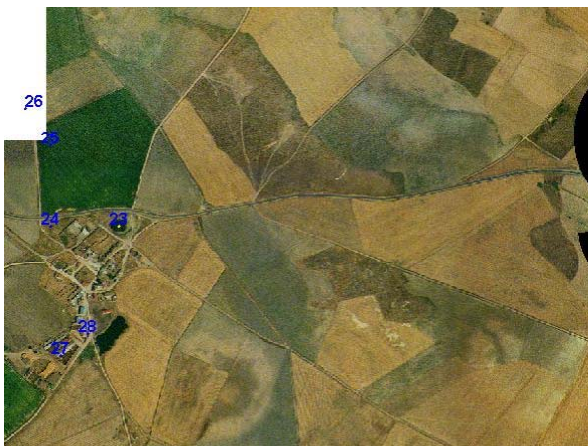
morf-18-esc-1500.jpg



morf-19-esc-1000.jpg



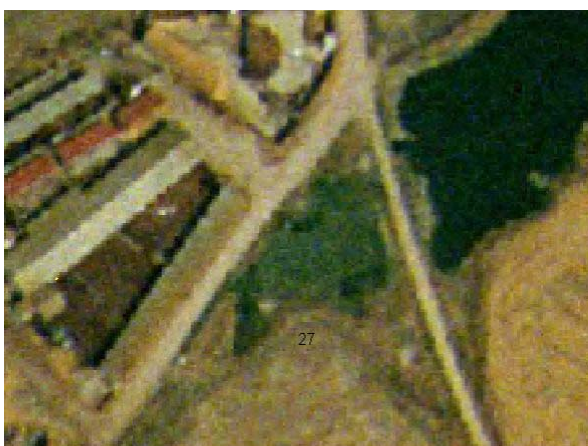
morf-22-esc-1000.jpg



morf-23-a-28-esc10000.jpg



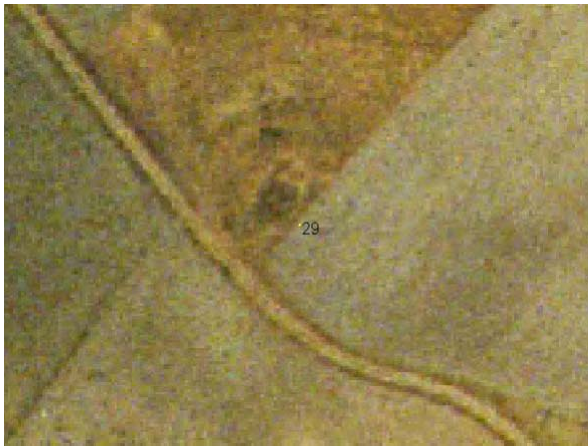
morf-23-esc-1000.jpg



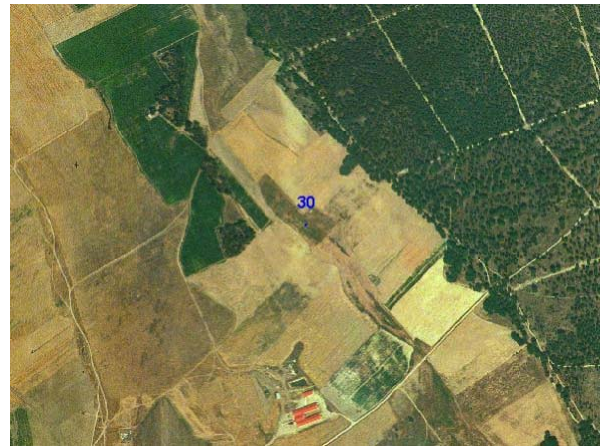
morf-27-esc-1000.jpg



morf-28-esc-1000.jpg



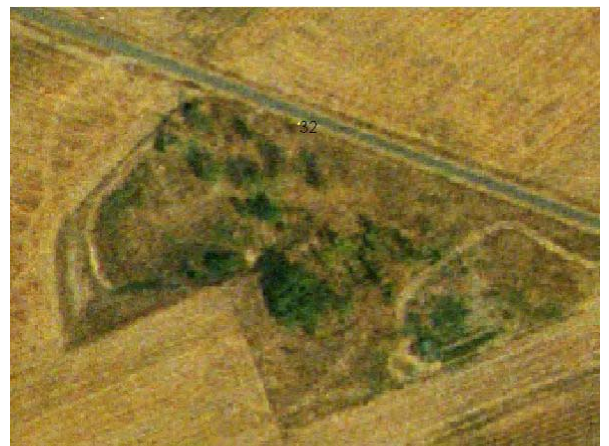
morf-29-esc-1000.jpg



morf-30-esc10000.jpg



morf-31-esc-1000.jpg



morf-32-esc-1500.jpg



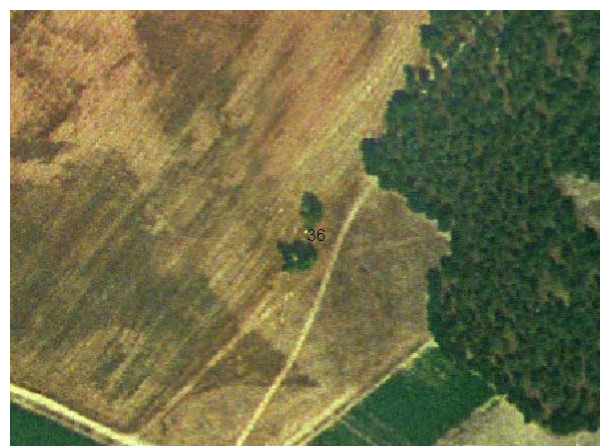
morf-33-esc-1500.jpg



morf-34-esc-1500.jpg



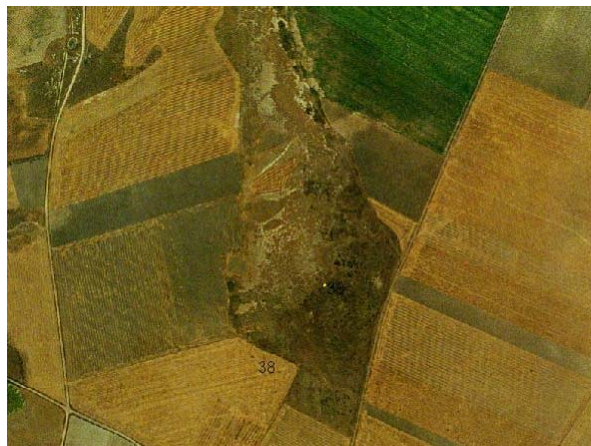
morf-35-esc-1000.jpg



morf-36-esc-2000.jpg



morf-37-esc-2000.jpg



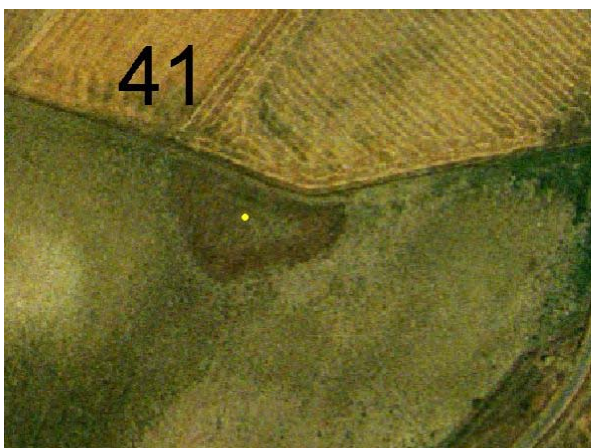
morf-38-esc-7000.jpg



morf-39-esc-4000.jpg



morf-40-esc-7000.jpg



morf-41-esc-2000.jpg



morf-42-esc-10000.jpg



morf-43-esc-3000.jpg



morf-44-esc-2500.jpg



morf-45-46-48-49-50-esc10000.jpg



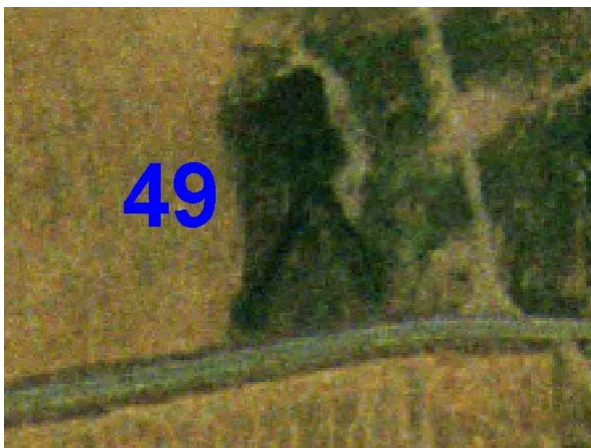
morf-45-esc-1000.jpg



morf-47-esc-8000.jpg



morf-48-a-51-esc10000.jpg



morf-49-esc-1000.jpg



morf-50-esc-2000.jpg



morf-51-esc-2000.jpg



morf-52-57-esc10000.jpg



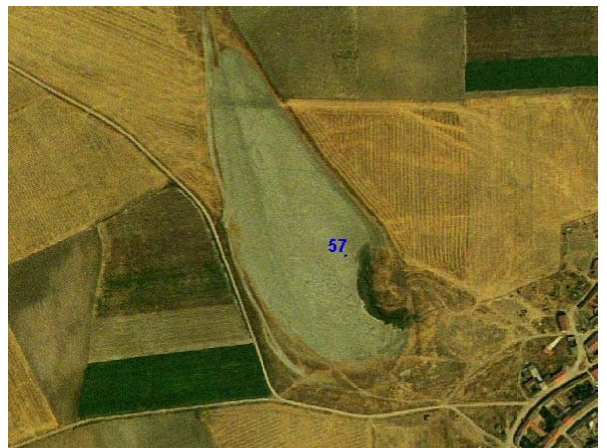
morf-52-esc10000.jpg



morf-53-esc-7500.jpg



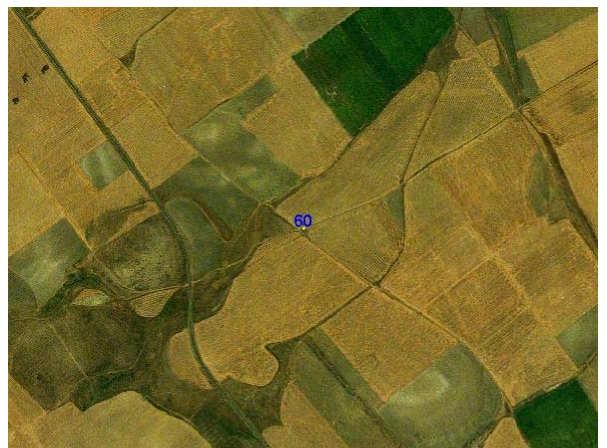
morf-56-esc-5000.jpg



morf-57-esc-5000.jpg



morf-58-esc-1500.jpg



morf-60-esc10000.jpg



morf-61-62-esc10000.jpg



morf-62-esc-5000.jpg



morf-63 Y 64-esc10000.jpg



morf-65 y 66-esc10000.jpg



morf-66-esc-1000.jpg



morf-67-esc-2000.jpg



morf-68-esc-4500.jpg

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.3.- FICHAS DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO



MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

N	NOMBRE	X	Y	Z	fecha	C (mmhos/cm)	pH
	Laguna de la Iglesia	368550	4562780		28/06/2002	1,50	9
	Laguna Caballo Alba	365500	4567250		28/06/2002	2,10	9,5

HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	N t %	P (ppm)	MOO %	Na (meq/100g)	K (meq/100g)
259	204	168	0,105	20	1,12	7.984	3.325
285	373	188	0,053	21	0,54	21.956	3.325

Ca (meq /100g)	Mg (meq/100g)	arena %	limo %	arcilla %	cl
11.407	15.929	4,95	27,25	67,8	ac
2.952	10.345	14,55	17,15	68,3	ac

Los Majuelos.

Location : Valladolid
 Site : LLano de Olmedo
 Sampling Date : 03/10/03
 Geology :
 Watertype : Na-K-Cl-SO₄

Sum of Anions (meq/l) : 112.2550
 Sum of Cations (meq/l) : 82.4880
 Balance: : -15.29%

Calculated TDS (mg/l) : 5868.2

Hardness : meq/l f g mg/l CaCO₃
 Total hardness : 10.83 54.14 30.32 541.4
 Permanent hardness : 0.0 0.00 0.00 0.0
 Temporary hardness : 10.83 54.14 30.32 541.4
 Alkalinity : 23.3 116.51 65.25 1165.1
 (1 f = 10 mg/l CaCO₃/l 1 g = 10 mg/l CaO)

Major ion composition

	mg/l	mmol/l	meq/l	meq%
Na+	972.0	42.279	42.279	21.71
K +	1148.0	29.361	29.361	15.077
Ca++	217.0	5.414	10.828	5.56
Mg++	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl-	2139.0	60.333	60.333	30.981
SO ₄ --	1373.0	14.294	28.587	14.679
HCO ₃ -	775.0	12.703	12.703	6.523

Ratios

	mg/l	mmol/l	Comparison to Seawater mg/l mmol/l
Ca/SO ₄	0.158	0.379	0.152 0.364
Na/Cl	0.454	0.701	0.556 0.858

Dissolved Minerals:

	mg/l	mmol/l
Halite (NaCl)	: 1811.908	30.9728
Sylvite (KCl)	: 2188.863	29.5393
Anhydrite (CaSO ₄)	: 1946.808	14.294
SiO ₂ as Quartz	: 9.989	0.166
or Feldspar (NaAlSi ₃ O ₈)	: 43.619	0.166

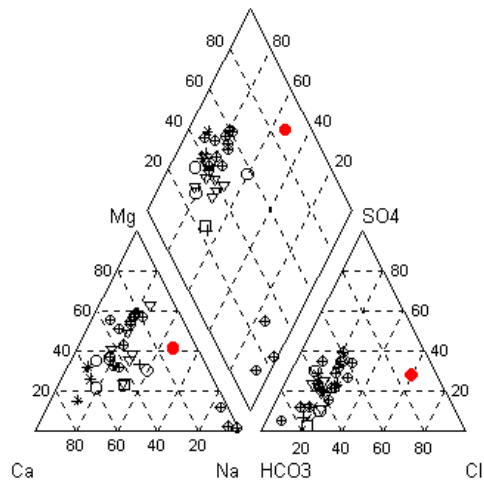
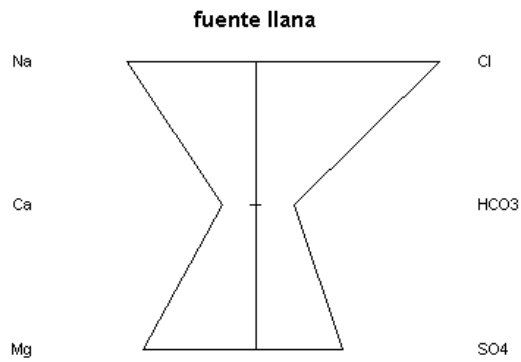
ANEXO 4.3.

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

Drinking Water Quality Regulations:

Element	Measured	Recommended	Maximum
pH	8.74	6.5- 8.5	< 9.5
Cond	8790	< 400	< 1250
Na	972	< 20	< 200
K	1148	< 10	< 12
Ca	217	< 100	
Cl	2139	< 25	
SO4	1373	< 25	< 250

Irrigation water:
Conductivity = 8790 uS (group C4: Very high salinity water)



MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

MUESTRA N° : 46 Ciruelos
LOCALIDAD : Ciruelos de Coca (SEGOVIA)
FECHA DEL MUESTREO: 01/10/99
GEOLOGÍA: Detrítico.
Facies hidroquímica : Mg-Ca-Na-HCO₃-SO₄

Sumatorio de los aniones (meq/l) : 20.25
 Sumatorio de los cationes (meq/l) : 21.25
 Balance: : 2.4%

Total de sólidos disueltos : 41.5 meq/l 1435. mg/l

Dureza : meq/l °f °g mg/l CaCO₃
 Dureza total : 16.1 80.51 45.09 805.1
 Dureza permanente : 6.59 32.97 18.47 329.7
 Dureza temporal : 9.51 47.53 26.62 475.3
 Alcalinidad : 9.51 47.53 26.62 475.3
 (1 °f = 10 mg/l CaCO₃/l 1 °g = 10 mg/l CaO)

Composición de iones mayoritarios

	mg/l	mmol/l	meq/l	meq%
Na+	112.0	4.872	4.872	11.738
K +	11.0	0.281	0.281	0.677
Ca++	110.0	2.745	5.489	13.225
Mg++	129.0	5.306	10.613	25.57
Cl-	145.0	4.09	4.09	9.854
SO ₄ --	222.0	2.311	4.622	11.136
HCO ₃ -	580.0	9.507	9.507	22.905

Relaciones iónicas

	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	0.853	0.517	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.495	1.188	0.152	0.364
Na/Cl	0.772	1.191	0.556	0.858

Comparación con el agua del mar

Gases disueltos bar)

Saturación de gases disueltos (30.0°C, p=1

	mg/l	mmol/l	mmol%	mg/l	mmol/l
O ₂	4.2	0.131	99.778	7.587	0.237

Minerales disueltos:

	mg/l	mmol/l
Halita (NaCl)	6.749	0.1154
Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	976.919	5.306
Anhidrita (CaSO ₄)	314.779	2.311

Referencias con los límites de potabilidad:

Elemento	Medido	Recomendado	Máximo
T (Wa)	17	< 12	< 25
Cond	2040	< 400	< 1250
Na	112	< 20	< 200
K	11	< 10	< 12
Mg	129	< 30	
Ca	110	< 100	
Cl	145	< 25	
SO ₄	222	< 25	< 250
NO ₃	126	< 25	< 50

Determinaciones específicas para el regadío:

Conductividad = 2040 uS (grupo C3: High Salinidad agua)

Relación de absorción de sodio (SAR) : 1.72

Porcentaje de sodio intercambiable (ESR) : 0.30

Riesgo de magnesificación (MH) : 65.91

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.4.- IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS Y CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4.4.1. LISTADOS DE IDENTIFICACIÓN Y CHEQUEO DE IMPACTOS



BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.4.- IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS Y CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO 4.4.2. FICHAS DE CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS HUMEDALES EN LA ZONA DE ESTUDIO. LAGUNA DE LAS ERAS, LAGUNA DE LA IGLESIA Y LAGUNA CABALLO ALBA



LAGUNA DE LA IGLESIA

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
CODIGO DEL LAGO/HUMEDAL	Nº 57. SG-3
TOPONIMIA	LAGUNA DE LA IGLESIA
UNIDAD ADMINISTRATIVA	COCA
AUTONOMÍA	CASTILLA-LEÓN
LOCALIDAD	VILLAGONZALO DE COCA (COCA)
HOJA 50.000	455 ARÉVALO
CUENCA	DUERO
SUBCUENCA	2229 CEDEX. Eresma Duero (Voltoya-Adaja)
HUSO:	30
COORDENADAS UTM X:	367434
Y:	4562545
Z:	798,1
TIPO	ENDORREICO Y SALINO
FIGURA DE PROTECCION	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-3
FOTO AEREA	8726 (1957); 428F (1987)
ORTOIMAGEN	428 S-3 (JCL 2000).
IMAGEN SATÉLITE	Spot órbita 031, Spot 2 de órbita 032 y Landsat de órbita 202
FOTOGRAFÍA	57.jpg (anexos 4.1.2. y 4.2.2.).
RESOLUCIÓN MDT DISPONIBLE	1 METRO
ACCESO	JUNTO A LA CARRETERA DE COCA A VILLAGONZALO
CARACTERÍSTICAS	
ORIGEN GENÉTICO	CUBETA TOPOGRÁFICA
HIDRODEPENDENCIA	NO
ACUÍFEROS RELACIONADOS	NO
SOBREEXPLOTADO SI/NO	SI
CONEXIÓN CON LA RED FLUVIAL	NO
EDAFOLOGÍA DEL ENTORNO	TERRENO ARCILLOSOS Y SALINO
FACIES HIDROQUÍMICA	SECO ENTRE 2002 Y 2004. PEQUEÑO CHARCO EN CUBETA OCASIONAL
ANÁLISIS QUÍMICOS	NO
PERÍMETRO DE PROTECCIÓN	NO
VULNERABILIDAD	ALTA
VALORACIÓN PAISAJÍSTICA	4
PRESENCIA DE VEGETACIÓN	HALOFITAS
PRESENCIA DE VEGETACIÓN NITRÓFILA	SI. ORLA PERIMETRAL
MORFOMETRÍA	
EJE MAYOR	482.6 m
EJE MENOR	227.5 m
ESCALA DISPONIBLE	NO
COTA ESCALA	NO
PROFUNDIDAD MÁXIMA CUENCO	1,4 m
Profundidad máxima	0 (2004)
Perímetro máximo (m)	1209
Anchura máxima (m)	227.5
Longitud máxima (m)	482.6
Superficie máxima (km ²)	0,794
Bibliografía (antecedentes)	Rey Benayas, 1990.

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS	
LIC (LUGARES DE INTERÉS	NO
ELEMENTO CULTURAL (PATRIMONIO	NO
ZEPa (ZONA ESPECIAL PROTECCIÓN	NO
ZEPAS	NO
RAMSAR	NO
OTROS (AUTONÓMICO)	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-3
ACTUACIONES EN EL HUMEDAL	
AFECTADO (TIPO DE AFECCIÓN)	Descenso nivel freático por incremento de las extracciones en su área de origen
RELLENADO (AÑO)	
DRENADO (AÑO)	SI/ NO DETERMINADO
CULTIVADO (ESPECIE)	NO
RODEADO POR	CEREALES. CEBADA.
REPRESADO (AÑO)	NO
EXCAVADO	NO
DRAGADO (AÑO)	NO
EXTRACCIONES ARIDOS	NO
REGULACION	SI. DREN EN EXTREMO SUR
EXTRACCIONES AGUA	NO
SUSCEPTIBILIDAD VERTIDOS	
URBANOS	NO
INDUSTRIALES	NO
AGRÍCOLAS	SI. INDICIOS CONTAMINACIÓN DIFUSA
TIPO AGROQUÍMICOS	SI.
PESTICIDAS	SI POR ARRASTRE
USOS Y APROVECHAMIENTOS DEL	
PASTOREO	OCASIONAL
ABREVADERO	NO
ABASTECIMIENTO	NO
EXTRACCIONES Y SALIDAS	NO
APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL	NO. SUSCEPTIBLE EMPLEO DADA SU ALTA
OTROS USOS	ESTÁTICO, PAISAJÍSTICO
USO PÚBLICO	
RECREO	NO
ACUICULTURA	SI (IMPACTO NEGATIVO POR
URBANIZADO	NO
CAZA	SI
PESCA	NO
EDUCATIVO	NO
RECREATIVO	NO
MEDICINAL	NO EN LA ACTUALIDAD
APROVECHAMIENTO VEGETACIÓN	NO
OTROS	NO
OBSERVACIONES USOS	SUSTRATO SALINO DE INTERÉS
DATOS ADMINISTRATIVOS	
PROPIEDAD	AYTO. COCA
ADMINISTRACIÓN	JCL

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

GRADO DE CONSERVACIÓN	4/TIPO AZUL (Fdez. Escalante, 2004)*
INSTRUCTOR/FUENTE	EFE/TESIS DOCTORAL
OBSERVACIONES	SUSCEPTIBLE MEJORA MEDIANTE RECARGA ARTIFICIAL ESTIMULADA
FECHA DEFINICIÓN	AGOSTO DE 2003

Observaciones adicionales:

*

Estado conservación:

- 5 agua- se puede mejorar
- 4 sin agua. Se puede recuperar. Sin cultivos alrededor
- 3 sin agua. Afectada. Con cultivos alrededor
- 2 Sin agua. Afectada sustancialmente. Roturada, drenada, cultivada
- 1 Sin agua. Afectada sustancialmente. Cambio de uso.

Funcionamiento:

Se distinguen cuatro tipos:

AZUL
AMARILLO
NARANJA
ROJO

- **AZUL** humedal hidrodependiente
- **AMARILLO** humedal asociado a la red de escorrentía superficial NO HIDRODEPENDIENTE/endorreico
- **NARANJA** humedal fuertemente degradado de difícil recuperación
- **ROJO** humedal indicial desaparecido. Encuestas, etc.

LAGUNA DE LAS ERAS

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
CODIGO DEL LAGO/HUMEDAL	Nº 56. SG-2
TOPONIMIA	LAGUNA DE LAS ERAS
UNIDAD ADMINISTRATIVA	COCA
AUTONOMÍA	CASTILLA-LEÓN
LOCALIDAD	VILLAGONZALO DE COCA (COCA)
HOJA 50.000	455 ARÉVALO
CUENCA	DUERO
SUBCUENCA	2229 CEDEX. Eresma Duero (Voltoya-Adaja)
HUSO:	30
COORDENADA X:	367434
Y:	4562545
Z:	798.1
TIPO	ENDORREICO SALINO
FIGURA DE PROTECCION	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-2
FOTO AEREA	8726 (1957); 428F (1987)
ORTOIMAGEN	428 5-3 (JCL 2000).
IMAGEN SATÉLITE	Spot órbita 031, Spot 2 de órbita 032 y Landsat de órbita 202
FOTOGRAFÍA	56.jpg (anexos 4.1.2. y 4.2.2.).
RESOLUCIÓN MDT DISPONIBLE	1 metro
ACCESO	Fácil desde Villagonzalo de Coca
CARACTERÍSTICAS	
ORIGEN GENÉTICO	CUBETA TOPOGRÁFICA
HIDRODEPENDENCIA	NO
ACUÍFEROS RELACIONADOS	NO
SOBREEXPLOTADO SI/NO	SI
CONEXIÓN CON LA RED FLUVIAL	NO
EDAFOLOGÍA DEL ENTORNO	TERRENO ARCILLOSO Y SALINO
FACIES HIDROQUÍMICA	NO
ANÁLISIS QUÍMICOS	SI. 2003. PARÁMETROS INESTABLES DE 2004. C= 2.366, Ph= 9,1.
PERÍMETRO DE PROTECCIÓN	NO
VULNERABILIDAD	ALTA
VALORACIÓN PAISAJÍSTICA	4
PRESENCIA DE VEGETACIÓN	HALOFITAS
PRESENCIA DE VEGETACIÓN	SI. ORLA PERIMETRAL
MORFOMETRÍA	
EJE MAYOR	468.9
EJE MENOR	164.9
ESCALA DISPONIBLE	NO
COTA ESCALA	NO
PROFUNDIDAD MÁXIMA CUENCO	140 cm
Profundidad máxima	60 cm (AGOSTO DE 2003)
Perímetro máximo (km)	1149 m
Anchura máxima (km)	164.9
Longitud máxima (km)	468.9
Superficie máxima (km ²)	0.515
Bibliografía (antecedentes)	Rey Benayas, 1990.

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ESPACIOS NATURALES	
LIC (LUGARES DE INTERÉS	NO
ELEMENTO CULTURAL	NO
ZEPa (ZONA ESPECIAL PROTECCIÓN	NO
ZEPAS	NO
RAMSAR	NO
OTROS (AUTONÓMICO)	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-2
ACTUACIONES EN EL HUMEDAL	
AFFECTADO (TIPO DE AFECCIÓN)	Descenso nivel freático por incremento de las extracciones en su área de origen
RELLENADO (AÑO)	NO ¿?
DRENADO (AÑO)	NO
CULTIVADO (ESPECIE)	NO
RODEADO POR	CEREALES. CEBADA. HORTÍCOLAS SECTOR OESTE
REPRESADO (AÑO)	NO
EXCAVADO	NO
DRAGADO (AÑO)	NO
EXTRACCIONES ARIDOS	NO. EXTRACCIONES OCASIONALES DE SAL
REGULACION	NO
EXTRACCIONES AGUA	NO
SUSCEPTIBILIDAD VERTIDOS	
URBANOS	ACCIDENTALES POR CERCANIA AL CASCO URBANO/FUGAS
INDUSTRIALES	NO
AGRÍCOLAS	SI. INDICIOS CONTAMINACIÓN DIFUSA
TIPO AGROQUÍMICOS	SI.
PESTICIDAS	SI
USOS Y APROVECHAMIENTOS DEL	
PASTOREO	OCASIONAL
ABREVADERO	NO
ABASTECIMIENTO	NO
EXTRACCIONES Y SALIDAS	NO
APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL	NO. SUSCEPTIBLE EMPLEO DADA SU ALTA SALINIDAD
OTROS USOS	RECREATIVO, PAISAJÍSTICO
USO PÚBLICO	
RECREO	SI
ACUICULTURA	SI (IMPACTO NEGATIVO POR SALINIZACIÓN)
URBANIZADO	NO
CAZA	SI
PESCA	NO
EDUCATIVO	SI
RECREATIVO	SI
MEDICINAL	NO EN LA ACTUALIDAD
APROVECHAMIENTO VEGETACIÓN	NO
OTROS	VALOR CIENTÍFICO Y DIDÁCTICO
OBSERVACIONES USOS	INTERÉS POR SU PRESERVACIÓN
DATOS ADMINISTRATIVOS	

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

PROPIEDAD	AYTO. COCA
ADMINISTRACIÓN	JCL
GRADO DE CONSERVACIÓN	5/TIPO AZUL (Fdez. Escalante, 2004)
INSTRUCTOR/FUENTE	EFE/TESIS DOCTORAL
OBSERVACIONES	SUSCEPTIBLE MEJORA MEDIANTE RECARGA ARTIFICIAL ESTIMULADA
FECHA DEFINICIÓN	AGOSTO DE 2003

Observaciones adicionales:

LAGUNA CABALLO ALBA

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
CODIGO DEL LAGO/HUMEDAL	Nº 40 Humedal 735 de la JCL.
TOPONIMIA	LAGUNA DE CABALLO ALBA
UNIDAD ADMINISTRATIVA	COCA
AUTONOMIA	CASTILLA-LEÓN
LOCALIDAD	VILLEGUILLO (SEGOVIA)
HOJA 50.000	428 OLMEDO
CUENCA	DUERO
SUBCUENCA	2229 CEDEX. Eresma Duero (Voltoya-Adaja)
HUSO:	30
COORDENADA X (UTM):	365529
Y:	4567306
Z:	768.7
TIPO	HUMEDAL ENDORREICO
FIGURA DE PROTECCION	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-1
FOTO AEREA	
ORTOIMAGEN	428 4-2 (JCL 2000).
IMAGEN SATELITE	Spot órbita 031, Spot 2 de órbita 032 y Landsat de órbita 202
FOTOGRAFÍA	40.jpg (anexos 4.1.2. y 4.2.2.).
RESOLUCIÓN MDT DISPONIBLE	1 metro
ACCESO	REGULAR. DESDE VILLEGUILLO AL OESTE O FUENTE DE SANTA CRUZ AL ESTE
CARACTERÍSTICAS	
ORIGEN GENÉTICO	CUBETA TOPOGRÁFICA ASOCIADO RED
HIDRODEPENDENCIA	SI
ACUÍFEROS RELACIONADOS	SI
SOBREEXPLOTADO SI/NO	SI
CONEXIÓN CON LA RED FLUVIAL	SI
EDAFOLOGÍA DEL ENTORNO	TERRENO ARCILLOSO Y SALINO
FACIES HIDROQUÍMICA	NO
ANÁLISIS QUÍMICOS	NO
PERÍMETRO DE PROTECCIÓN	NO
VULNERABILIDAD	ALTA
VALORACIÓN PAISAJÍSTICA	4
PRESENCIA DE VEGETACIÓN	HALOFITAS
PRESENCIA DE VEGETACIÓN NITRÓFILA	SI. ZONA DE PLAYA Y ORLA PERIMETRAL
MORFOMETRÍA	
EJE MAYOR	555.1
EJE MENOR	552.7
ESCALA DISPONIBLE	NO
COTA ESCALA	NO
PROFUNDIDAD MÁXIMA CUENCO	1,2 m
Profundidad máxima	0
Perímetro máximo (m)	2139
Anchura máxima (m)	555.1
Longitud máxima (m)	552.7
Superficie máxima (km ²)	1.972
Bibliografía (antecedentes)	LBAS, 1994; Casado y Montes, 1***

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS	
LIC (LUGARES DE INTERÉS	NO
ELEMENTO CULTURAL (PATRIMONIO	NO
ZEPa (ZONA ESPECIAL PROTECCIÓN	NO
ZEPAS	NO
RAMSAR	NO
OTROS (AUTONÓMICO)	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-1
ACTUACIONES EN EL HUMEDAL	
AFECTADO (TIPO DE AFECCIÓN)	Descenso nivel freático hasta desecación por incremento extracciones área de origen aguas
RELLENADO (AÑO)	NO ¿?
DRENADO (AÑO)	SI ¿?
CULTIVADO (ESPECIE)	NO
RODEADO POR	CEREALES. CEBADA.
REPRESADO (AÑO)	NO
EXCAVADO	NO
DRAGADO (AÑO)	NO
EXTRACCIONES ARIDOS	NO. EXTRACCIONES OCASIONALES DE SAL
REGULACION	NO
EXTRACCIONES AGUA	NO
SUSCEPTIBILIDAD VERTIDOS	
URBANOS	NO
INDUSTRIALES	NO
AGRÍCOLAS	SI. CONTAMINACIÓN DIFUSA
TIPO AGROQUÍMICOS	SI.
PESTICIDAS	NO
USOS Y APROVECHAMIENTOS	
PASTOREO	NO
ABREVADERO	NO
ABASTECIMIENTO	NO
EXTRACCIONES Y SALIDAS	NO
APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL	NO. SUSCEPTIBLE EMPLEO DADA SU ALTA SALINIDAD
OTROS USOS	PAISAJÍSTICO
USO PÚBLICO	
RECREO	SI
ACUICULTURA	SI (IMPACTO NEGATIVO POR SALINIZACIÓN)
URBANIZADO	NO
CAZA	SI
PESCA	NO
EDUCATIVO	SI
RECREATIVO	SI
MEDICINAL	NO EN LA ACTUALIDAD
APROVECHAMIENTO VEGETACIÓN	NO
OTROS	VALOR CIENTÍFICO Y DIDÁCTICO
OBSERVACIONES USOS	INTERÉS POR SU PRESERVACIÓN

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

DATOS ADMINISTRATIVOS	
PROPIEDAD	AYTO VILLEGUILLO
ADMINISTRACIÓN	JCL
GRADO DE CONSERVACIÓN	3/TIPO AZUL (Fdez. Escalante, 2004)
INSTRUCTOR/FUENTE	EFE/TESIS DOCTORAL
OBSERVACIONES	SUSCEPTIBLE MEJORA MEDIANTE RECARGA ARTIFICIAL ESTIMULADA
FECHA DEFINICIÓN	AGOSTO DE 2003

Observaciones adicionales:

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.5.- APLICACIÓN DEL SISTEMA DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES

ANEXO 4.5.1. Indicadores medioambientales de presión

ANEXO 4.5.2. Indicadores medioambientales de estado

ANEXO 4.5.3. Indicadores medioambientales de respuesta



CÁLCULO DEL SISTEMA RANGOS-PESOS PARA INDICADORES DE ESTADO

TABLA RESUMEN

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR (SI APLICA)	TOTAL
1). RÍOS Y HUMEDALES CON BUENA CALIDAD SEGÚN LOS ÍNDICES BIÓTICOS (ÍNDICE BMWP) (INDICADOR A3 DEL MIMAM).	P/A	0/100	100-PESO	
2). ÍNDICE DE CALIDAD GENERAL (ÍNDICE ICG) (A4 MIMAM).	E/B/I/A/i	0-100	100-PESO	
3). ACUÍFEROS CONTAMINADOS POR NITRATOS (A1 MIMAM).		25/50/75/100		
4). CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE LA CONTAMINACIÓN DIFUSA (CRIPTAS).	0-201	25/50/75/100		
5). ACUÍFEROS SALINIZADOS POR INTRUSIÓN SALINA CONTINENTAL.	0->500	25/50/75/100		
6). SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.	0->500	25/50/75/100		
7). EVALUACIÓN DEL VALOR DE LA TURBIDEZ Y TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS (TSD) EN EL AGUA DE RECARGA.	0->30	25/50/75/100		
8). NIVEL DEL AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE OBSERVACIÓN.	>4-<2	25/50/75/100	x 2 si $10 < K < 100$ x 3 si $100 < K < 1.000$	
9). DIFERENCIA DE COTA MEDIA ENTRE EL NIVEL FREÁTICO Y EL NIVEL DEL AGUA DE RECARGA EN CADA UHA.	>4-<2	25/50/75/100	x 2 si $10 < K < 100$ x 3 si $100 < K < 1.000$	
10). PORCENTAJE DE FINOS EN EL SUELO. INDICADOR INICIAL DE LA COLMATACIÓN.	0->20	25/50/75/100		
TOTAL				

Diseño de la tabla empleada para el cálculo del sistema de indicadores medioambientales de estado y su evolución.

CÁLCULO DEL SISTEMA RANGOS-PESOS PARA INDICADORES DE PRESIÓN.

TABLA-RESUMEN

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR (SI APLICA)	TOTAL
1). SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS POR EL REGADÍO.	0-25%	0/50/75/100	X1/X2/X4/X8	
2). BALANCE DE NUTRIENTES EN LAS AGUAS DE RECARGA.	0->8	25/50/75/100		
3). MODERNIZACIÓN Y MEJORA DE LOS DISPOSITIVOS.				0-100
4). EFICACIA DEL USO DEL AGUA.				100-0
5). EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA.	< o >			
6). PROCEDENCIA POLÍTICA DE LA ACTIVIDAD.		PROPOSICIONES/ REALIZACIONES		
7). CERCANÍA AL DISPOSITIVO DE RECARGA. (DÍAS)	T _t	0/5/10/20		
8). RADIO DE INFLUENCIA (METROS)		0/100/200/500		
9). PRESENCIA DE ECOSISTEMAS HIDRODEPENDIENTES Y TERMODEPENDIENTES.		P/A 0/100		
10). RELACIÓN DE LOS HUMEDALES CON OTROS ACUÍFEROS, MANANTIALES, HUMEDALES, LAGUNAS, ETC.		VARIACIÓN RELATIVA 0-5-10-20%		
TOTAL				

Cálculo del estado de presión a partir del sistema de rangos-pesos sobre los indicadores de presión.

SISTEMA RANGOS-PESOS PARA INDICADORES DE RESPUESTA.
TABLA RESUMEN.

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR (SI APLICA)	TOTAL
1). Evolución de las dimensiones del caz de recarga.				n.º horas
2). Aterramiento de canales, presas, cauces artificiales y/o naturales, etc.				$\pm \Delta \text{cm}$
3). Aumento de la erosión y acarcavamiento de los taludes y área de influencia.				
4). Diferencias de cota y pendientes.				$2 \pm \Delta \text{cm}$
5). Alteraciones en los parámetros hidrogeológicos.				$\pm K, S \text{ y } T$
6). Colmatación de los dispositivos, taludes y descenso de la permeabilidad del lecho.				$\pm \Delta \%$ finos
7). Concentración de oxígeno disuelto en los piezómetros de observación de la red de control de la recarga y relación con hierro y nitratos en disolución (isorelaciones iónicas).				$\pm \Delta \text{O}_2$ (ppm) R.I. Fe/O ₂ y NO ₃ /O ₂
8). Evolución de la calidad del agua subterránea por el uso de fertilizantes nitrogenados en el regadío.				$\pm \Delta \text{NO}_3$ (ppm)
9). Concentración en carbonato en las aguas de recarga.				$\pm \Delta \text{CO}_3^-$ (ppm)
10). Afección en cultivos dentro del área de influencia.				€/ año
11). Afección en la vegetación nativa dentro del área de influencia.				P/A
12). Variaciones en las condiciones ecológicas en los humedales.				P/A
13). Variaciones en el nivel del agua del cuenco en los humedales o del nivel freático en criptohumedales.				$\pm \Delta \text{cm}$
14). Reducción del consumo indebido de agua.				$\pm \Delta \%$ pérdidas
15). Balance de nutrientes en el regadío.				$\pm \Delta \%$ sobrecargas
TOTAL				

Cálculo del estado de presión a partir del sistema de rangos-pesos sobre los indicadores de respuesta

BLOQUE 4.- MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

ANEXO 4.6.-POLÍGONOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA DEFINIR EL ESTADO INICIAL Y EVOLUCIÓN DE LOS HUMEDALES COMO CONSECUENCIA DE LAS OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL



MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

INDICADORES DE ESTADO/PRESIÓN	< NIVEL DE PONDERACIÓN >				
1). Ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos (índice BMWP).					
2). Índice de calidad general (índice ICG).					
3). Acuíferos contaminados por nitratos.					
4). Caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación difusa (CRIPTAS).					
5). Acuíferos salinizados por intrusión salina continental.					
6). Salinización de las aguas subterráneas.					
7). Evaluación del valor de la turbidez y Total de Sólidos Disueltos (TSD) en el agua de recarga.					
8). Nivel del agua en los piezómetros de observación.					
9). Diferencia de cota media entre el nivel freático y el nivel del agua de recarga en cada UHA.					
10). Porcentaje de finos en el suelo. indicador inicial de la colmatación.					
1). Sobreexplotación de acuíferos por el regadío.					
2). Balance de nutrientes en las aguas de recarga.					
3). Modernización y mejora de los dispositivos.					
4). Eficacia del uso del agua.					
5). Evaluación socioeconómica.					
6). Procedencia política de la actividad.					
7). Cercanía al dispositivo de recarga.					
8). Radio de influencia.					
9). Presencia de ecosistemas hidrodependientes y termodependientes.					
10). Relación de los humedales con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas, etc.					

RÍOS/HUMEDALES CON BUENA CALIDAD SEGÚN ÍNDICES BIÓTICOS (ÍNDICE BMWP')	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
PRESENCIA 0 AUSENCIA 100	> 120:	Aguas muy limpias.		
	101-120:	Aguas no contaminadas de modo sensible.		
	61-101:	Efectos evidentes de la contaminación		
	36-60:	Aguas contaminadas.		
	16-35:	Aguas muy contaminadas.		
	< 15:	Aguas fuertemente contaminadas.		

Pesos asignados de acuerdo con la diferencia de su determinación menos 100.

ÍNDICE DE CALIDAD GENERAL (ÍNDICE ICG)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Pesos asignados de acuerdo con la diferencia de su determinación menos 100.	100-85:	Excelente		
	85-75:	Buena		
	75-65:	Intermedia		
	65-50:	Admisible		
	50-0:	inadmisible		

ACUÍFEROS CONTAMINADOS POR NITRATOS	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Valor máximo detectado en la zona: 284 ppm (1999)	0-100:	25		
Determinación directa.	101-150:	50		
	151-200:	75		
	> 201:	100		

VULNERABILIDAD A LOS PESTICIDAS Y PLAGUICIDAS (CRIPTAS)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Valores CRIPTAS medidos en la zona: 161 (1999) y 151 (2004)	0-100:	25		
Determinación directa.	101-150:	50		
	151-200:	75		
	> 201:	100		

ACUÍFEROS SALINIZADOS POR INTRUSIÓN SALINA CONTINENTAL	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-100:	25		
	101-200:	50		
	201-500:	75		

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

> 500:	100		
--------	-----	--	--

SALINIZACIÓN DEL ACUÍFERO	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-100:	25		
	101-200:	50		
	201-500:	75		
	> 500:	100		

TURBIDEZ Y TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS EN EL AGUA DE RECARGA (TSS+TSD)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-10 ppm:	25		
	10-20 ppm:	50		
	20-30 ppm:	75		
	> 30 ppm:	100		

NIVEL DEL AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE OBSERVACIÓN	RANGOS	PESOS (K)	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	>4 m vert:	25	X 2	
Si $10 < K < 100$: peso X 2	de 3 a 4:	50	X 3	
K ≥ 100 : peso x 3	de 2 a 3:	75		
	< 2:	100		

COTA MEDIA DEL NF MENOS COTA NIVEL DEL AGUA DE RECARGA EN CADA UHA	RANGOS	PESOS (K)	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	>4 m vert:	25	X 2	
Si $10 < K < 100$: peso X 2	de 3 a 4:	50	X 3	
K ≥ 100 : peso x 3	de 2 a 3:	75		
	< 2:	100		

PORCENTAJE DE FINOS EN EL SUELO	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-5%:	25		
	5-10%:	50		
	10-20%:	75		
	>20%:	100		

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS POR EL REGADÍO	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
	Recarga >>> extracciones:	0	x 1 si es el primer año de sequía	
	Recarga = extracciones - 10 %:	50	x 2 si es el segundo año	
	Recarga = extracciones - 10 a 25 %:	75	x 4 si es el tercer año seco consecutivo	
	Recarga = extracciones - >25 %:	100	x 8 Así sucesivamente	
				25*
BALANCE DE NUTRIENTES EN LAS AGUAS DE RECARGA	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
	0-5	25		
	De 5 a 7	50		
	De 7 a 8	75		
	> 8	100		
MODERNIZACIÓN Y MEJORA DE LOS DISPOSITIVOS	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Idoneidad del diseño.				
Efectividad del trazado.				
Grado de ajuste de los dispositivos empleados a los ideales para este tipo de acuíferos.				
Capacidad de pretratamiento del agua de recarga.				
Efectividad de los filtros.				
Efectividad de los dispositivos de decantación.				
Efectividad de los dispositivos de protección frente a agentes externos (avenidas, barro, etc.).				
Efectividad de los dispositivos de desoxigenación.				
Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.				
Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.				
Evaluación final media	Media de la evaluación de 0 a 100 de los parámetros			
EFICACIA DEL USO DEL AGUA	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Efectividad de los dispositivos de desoxigenación (máxima =0)		0*		
Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.		0*		
Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.		0*		
Evaluación final media	Media de la evaluación de 0 a 100 de los parámetros			
EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
		0*		0
PROCEDENCIA POLÍTICA DE LA ACTIVIDAD	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
		0*		0
CERCANÍA AL DISPOSITIVO DE RECARGA**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Medido en tiempo de tránsito de las aguas subterráneas (días)	0-5:	25		
	5-10:	50		
	10-20:	75		
	>20:	100		
RADIO DE INFLUENCIA**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
	0-100:	25		
	101-200:	50		
	201-500:	75		
	> 500:	100		0

MEDIO AMBIENTE Y RECARGA ARTIFICIAL

PRESENCIA DE ECOSISTEMAS HIDRODEPENDIENTES Y TERMODEPENDIENTES**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
PRESENCIA 0	PRESENCIA	0		
AUSENCIA 100	AUSENCIA	100		0
RELACIÓN DE LOS HUMEDALES CON OTROS ACUÍFEROS, HUMEDALES, MANANTIALES, ETC.*	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Variación entre medidas consecutivas del nivel del agua de humedales o caudal de los manantiales.	0-5%:	25		
	5-10%:	50		
	10-20%:	75		
	>20%:	100		0

* Pesos asignados para el primer ciclo de recarga que previsiblemente variará en ciclos posteriores.

** Indicadores que no pueden ser precisados hasta el comienzo de las actuaciones.

INDICADORES DE RESPUESTA

EVOLUCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL CAZ DE RECARGA.
ATERRAMIENTO DE CANALES, PRESAS, CAUCES ARTIFICIALES Y/O NATURALES, ETC.
AUMENTO DE LA EROSIÓN Y ACARCAVAMIENTO DE LOS TALUDES Y ÁREA DE INFLUENCIA.
DIFERENCIAS DE COTA Y PENDIENTES.
ALTERACIONES EN LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS.
COLMATACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS, TALUDES Y DESCENSO DE LA PERMEABILIDAD DEL LECHO.
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN LOS PIEZÓMETROS DE OBSERVACIÓN DE LA RED DE CONTROL DE LA RECARGA E ISORRELACIONES IÓNICAS.
EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA POR EL USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN EL REGADÍO.
CONCENTRACIÓN EN CARBONATO EN LAS AGUAS DE RECARGA.
AFECCIÓN EN CULTIVOS DENTRO DEL ÁREA DE INFLUENCIA.
AFECCIÓN EN LA VEGETACIÓN NATIVA DENTRO DEL ÁREA DE INFLUENCIA.
VARIACIONES EN LAS CONDICIONES ECOLÓGICAS EN LOS HUMEDALES.
VARIACIONES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL CUENCO EN LOS HUMEDALES O DEL NIVEL FREÁTICO EN CRIPTOHUMEDALES.
REDUCCIÓN DEL CONSUMO INDEBIDO DE AGUA.
BALANCE DE NUTRIENTES EN EL REGADÍO.